

О.А. ГЕРАЩЕНКО
А.Н. ГОРДОВ
В.И. ЛАХ
Б.И. СТАДНЫЙ
Н.А. ЯРЫШЕВ

Температурные измерения

СПРАВОЧНИК

ИКС

АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ТЕХНИЧЕСКОЙ
ТЕПЛОФИЗИКИ

О.А. ГЕРАЩЕНКО
А.Н. ГОРДОВ
В.И. ЛАХ
Б.И. СТАДНЫК
Н.А. ЯРЫШЕВ

Температурные измерения

СПРАВОЧНИК

КИЕВ
НАУКОВА ДУМКА
1984

УДК 536.5 (430.1)

Справочник содержит полную информацию о современных средствах измерения температуры применительно к различным областям науки и технологии. Приведены сведения об апробированных в эксплуатации термометрических средствах с учетом использования стандартных и нестандартных материалов и изделий, выпускаемых промышленностью. Даны метрологические основы термометрии, доведенные до конкретных определений погрешностей.

Для инженеров, научных работников, преподавателей, аспирантов и студентов технических, физико-технических и других специальностей.

Ответственный редактор *О. А. Геращенко*

Рецензенты *Б. Н. Олейник, В. С. Кочо*

Редакция справочной литературы



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	6
Основные сокращения и условные обозначения физических величин	8
Глава 1. История развития термометрии	9
Глава 2. Физические основы температурных измерений	15
2.1. Температурные шкалы	15
2.2. Термодинамическая температура	16
2.3. Газовые термометры	17
2.4. Термодинамическая шкала температур	19
2.5. Тепловое излучение	20
2.6. Термолуминовая термометрия	21
2.7. Магнитная термометрия	22
2.8. Использование эффекта Джозефсона	23
Глава 3. Международная практическая температурная шкала	24
3.1. Основные положения	24
3.2. Определение Международной практической температурной шкалы (МПТШ-68)	25
3.3. Дополнительные сведения	31
3.4. Практические температурные шкалы для области температур ниже 13, 81 К	38
3.5. Аппаратура для воспроизведения и хранения МПТШ	38
3.6. Аппаратура для экстраполяции температурной шкалы	44
3.7. Температурные лампы	47
3.8. Система обеспечения единства измерений температуры.	49
Глава 4. Погрешности измерения температуры жидкостей и газов.	53
4.1. Классификация погрешностей средств измерения температуры	53
4.2. Источники методических погрешностей ИПТ	55
4.3. Математические модели и характеристики теплообмена ИПТ и исследуемых объектов	57
4.4. Методические погрешности однородных ИПТ	60
4.5. Оценка влияния различных факторов на точность измерения температуры	65
4.6. Динамические характеристики ИПТ	68
4.7. Оценка случайной составляющей методической погрешности	73
4.8. Выбор средства измерения температуры	76

Глава 5. Жидкостно-стеклянные термометры	82
5.1. Термометрические стекла	82
5.2. Термометрические жидкости для ЖСТ	84
5.3. Шкалы, чувствительность, погрешности	86
5.4. Практические особенности измерений ЖСТ	87
5.5. ЖСТ специального назначения	89
5.6. Серийные ЖСТ, выпускаемые промышленностью	93
Глава 6. Манометрические термометры	123
6.1. Принцип действия, классификация и устройство	123
6.2. Температурные диапазоны работы манометрических термометров	125
6.3. Погрешности манометрических термометров и способы их уменьшения	126
6.4. Характеристики промышленных манометрических термометров	127
Глава 7. Термопреобразователи сопротивления	132
7.1. Платиновые ТС	133
7.2. ТС с чувствительными элементами из других материалов	138
7.3. Промышленные ТС	141
7.4. Полупроводниковые ТС	160
7.5. Поверка ТС	177
7.6. Номинальные статические характеристики преобразования ТС	183
Глава 8. Термоэлектрические преобразователи	206
8.1. Термоэлектрические явления. Термопары	206
8.2. Изготовление термопар	220
8.3. Термопары для измерения низких температур	224
8.4. Термопары для измерения средних температур	235
8.5. Термопары для измерения высоких температур	252
8.6. Защита термопар	289
8.7. Конструкции и типы ПТ	293
8.8. Поверка и определение номинальных статических характеристик термопар и ПТ	302
Глава 9. Пирометры	304
9.1. Тепловое излучение	304
9.2. Физические законы излучения	304
9.3. Практические следствия законов излучения	315
9.4. Погрешности пирометров излучения	323
9.5. Оптические пирометры с исчезающей нитью	335
9.6. Агрегатный комплекс стационарных пирометрических преобразователей	343
Глава 10. Температурные индикаторы	372
10.1. Плавкие металлические вставки	372
10.2. Конуса Зегера	373
10.3. Термочувствительные краски	373
10.4. Облученные кристаллы	385
Глава 11. Методические погрешности измерения температуры поверхности и внутри тела.	388
11.1. Погрешности измерения температуры внутри тела	388
11.2. Измерение внутренних температур ИПТ стержневого типа	390

11.3. Измерение температуры поверхности тела при внешнем расположении ИПТ	391
11.4. Измерение температуры поверхности массивных объектов ИПТ	398
11.5. Измерение температуры поверхности стенок плоскими (пластинчатыми) ИПТ	403
11.6. Измерение температуры поверхности при расположении ИПТ внутри тела	406
11.7. Пространственно-временное восстановление температуры по ограниченному числу результатов измерений	410
Глава 12. Измерение температур пламен	412
12.1. Общие сведения о характере излучения пламен	412
12.2. Особенности применения контактных методов для измерения температур пламен	414
12.3. Метод обращения спектральных линий	414
12.4. Метод лучеиспускания и поглощения	417
12.5. Метод абсолютной интенсивности спектральной линии	418
12.6. Метод относительных интенсивностей спектральных линий	420
12.7. Определение температуры по доплеровскому уширению спектральных линий	421
12.8. Определение «вращательной» температуры	421
12.9. Определение «колебательной» температуры	422
12.10. Метод яркостной температуры	422
12.11. Метод цветовой температуры	423
12.12. Выбор метода измерения температуры пламени	424
Библиографический указатель	426
Рубрикатор	426
Принятые сокращения	427
Дополнение	482
Алфавитный указатель	491

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современный научно-технический прогресс характеризуется значительной интенсификацией технологических процессов, непрерывным ростом производительности труда и повышением качества продукции, снижением удельных трудовых затрат. Усугубление энергетического кризиса делает актуальной необходимость существенного снижения энергоемкости производства. Обострение требований экологии ставит на повестку дня вопрос значительного повышения общей культуры производства и жизнедеятельности. Благоприятно сопутствующим фактором в решении перечисленных задач является дальнейшее развитие и успешное внедрение автоматических систем управления на основе эффективной последовательной переработки первичной информации современными кибернетическими устройствами и с использованием микропроцессоров и ЭВМ.

Температура играет важную роль в повседневной жизни, в познании природы, исследовании новых явлений, является одним из шести физических параметров, на которых основана Международная система единиц СИ. Особое значение имеет температура при контроле, автоматизации и управлении технологическими процессами. Точность соблюдения температурного режима часто определяет не только качество, но и принципиальные возможности применения продукции в определенных целях, например при выращивании полупроводниковых монокристаллов. В современных условиях технологические требования к точности поддержания температуры находятся на уровне выших метрологических достижений.

Основу справочника составляет практически важная информация о термометрических средствах, серийно выпускаемых промышленностью СССР. Эта информация систематизирована в виде таблиц, содержащих общие физико-технические и эксплуатационные характеристики термометров в самом широком понимании. Попутно приведены сведения об аппаратурных свойствах, не поддающихся табличной систематизации.

Строго справочной информации предшествуют краткие сведения по истории развития термометрических понятий и становления методов и средств измерения, физическим основам термометрических явлений и способам их реализации, температурным шкалам и метрологическим характеристикам средств измерения, систематическим и случайным погрешностям температурных измерений. Дальнейшее изложение связано с реализацией конкретных методов контактной и бесконтактной термометрии. Описание термометров, выпускаемых промышленностью, сопровождается рекомендациями по их использованию как в традиционных (соответствующих их назначению), так и нетрадиционных условиях. В ряде случаев, особенно это касается научно-

исследовательской практики, даны рекомендации по решению задач, возникающих в нестандартных условиях.

Главы 1 и 5 написаны О. А. Геращенко, 2, 3, 12 и параграф 8 главы 4 — А. Н. Гордовым, 7, 9 — В. И. Лахом, 8, 10 — Б. И. Стадником, 4, 6, 11 — Н. А. Ярышевым. В библиографическом указателе приведены литературные источники, использованные авторами при написании справочника, а также источники, в которых читатель может найти более полную информацию по термометрии.

Рукопись справочника подробно рассмотрена рецензентами доктором технических наук В. С. Кочо и доктором технических наук Б. Н. Олейником. В некоторых случаях они предоставили в распоряжение авторов более совершенную, а иногда и оригинальную информацию. При подготовке к изданию рукопись детально обсуждалась в отделе теплотеметрии Института технической теплофизики АН УССР. Заметному ее улучшению в результате обсуждений пользователь справочника обязан Т. Г. Грищенко, С. А. Сажинной, В. Н. Черинько, Н. А. Светличной, Л. А. Лукашевич, Л. И. Наздриной, Н. Ю. Сыпченко, Н. Г. Фокиной, Л. Н. Шалимовой. В справочнике, естественно, возможны некоторые упущения и недостатки. Авторы с благодарностью примут критические замечания и пожелания читателей.

Член-корреспондент АН УССР
О. А. Геращенко

ОСНОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

- АЧТ — абсолютно черное тело
ГСП — государственная система приборов
ЖСТ — жидкостно-стеклянный термометр
ИПТ — измерительный (первичный) преобразователь температуры
МПТШ — международная практическая температурная шкала
ПВ — вторичный преобразователь
ПП — пирометрический преобразователь
ПС — полупроводниковое сопротивление
ТКС — температурный коэффициент сопротивления
ТС — термопреобразователь сопротивления
ПТ — термоэлектрический преобразователь
 a — коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$
 c — удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$
 E — ЭДС (термоЭДС), мВ
 f — частота, Гц
 h — постоянная Планка, $\text{Дж}/\text{Гц}$
 J — сила электрического тока, А
 K — коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$
 k — постоянная Больцмана, $\text{Дж}/\text{К}$
 L — длина, м
 l — размер, расстояние, м
 p — давление, $\text{Н}/\text{м}^2$; периметр, м; мощность, Вт
 Q — количество тепла, Дж
 q — плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$
 R — электрическое сопротивление, Ом
 S — удельный коэффициент термоЭДС, В/К
 s — параметр преобразования Лапласа
 T — температура, измеренная по абсолютной шкале, К
 t — температура, измеренная по шкале Цельсия, $^{\circ}\text{C}$
 V — объем, м^3
 α — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; температурный коэффициент сопротивления, К^{-1} ; коэффициент термоЭДС, В/К
 β — коэффициент объемного расширения, К^{-1}
 γ — плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$
 η — коэффициент полезного действия
 λ — длина волны, мкм; коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$
 ρ — удельное электрическое сопротивление, Ом \cdot м
 τ — время, постоянная времени, с
 ω — угловая частота, Гц
 χ — магнитная восприимчивость

Осязательная доступность температуры общеизвестна издревле. К первому тысячелетию до нашей эры относится появление основных составляющих окружающего мира. Среди первых элементов мира наряду с землей, водой и воздухом был огонь, которому во многих внешних проявлениях приписывались свойства, обобщаемые современным понятием температуры. Демокрит и Левкипп оперировали понятием элементарного огня в общефизических представлениях, Гиппократ — применительно к медицинским проблемам. Однако, по-видимому, не ими было введено это понятие, так как Аристотель при обсуждении четырехэлементного мира ссылается на «древних» без упоминания имен. Трудности «древних» в составлении четкого представления о понятии температуры объяснялись многими причинами, связанными с отсутствием какой бы то ни было измерительной техники, порочностью презрительного отношения к эксперименту — занятию «рабскому», недопустимому для философов, и внутренним противоречием информации о тепловых проявлениях в окружающем мире. Температура является показателем интенсивности, т. е. качественной характеристикой. Поэтому понятие температуры в простых представлениях смешивается с понятием количества теплоты, лежащим в основе осязательных ощущений. Теплоте свойственна суперпозиция, температуре — нет. Трудно было понять, почему нагретые на огне вода, масло или смола в кратковременном соприкосновении воздействовали заметно сильнее, чем сам первопричинный огонь. В средние века многократно был описан опыт, в котором предлагалось одну руку выдерживать в теплой воде, а другую — в холодной. После этого смешанная вода ощущается одной рукой как холодная, другой — как теплая. Помещение глубокой пещеры, подвала представляется зимой теплым, а летом прохладным. В связи с большой параметрической чувствительностью организма к тепловому воздействию представления о понятии температуры долго покоились на субъективной основе. Это препятствовало построению представлений в четкой, логически замкнутой последовательности умозаключений. Для сравнения можно привести измерение угла наклона эклиптики Эратосфеном: за 22 столетия эта величина уточнилась к настоящему времени только на 6 угловых минут. В силу чисто физиологических причин, связанных с терморегуляцией, теплокровные организмы способны очень остро реагировать на изменение теплового воздействия окружающей среды с переходом от нагревания к охлаждению и наоборот. При температуре, близкой к телесной, организм в состоянии реагировать на изменения порядка 0,1 К. Задолго до появления первых инструментов для измерения температуры из повседневного опыта были известны главные ее параметрические свойства, в частности стремление теплоты к температурному

равновесию с помощью перехода от горячих тел к холодным. Равновесная температура четко представлялась ниже температуры первоначально горячего тела и выше первоначально холодного. Подобные идеи повсюду воспринимались настолько одинаково, что в равной мере глубоко вошли во все известные языки с древнейших времен.

На основе чувственных восприятий окружающих явлений, естественно, пришли к последовательности таких понятий, как зимняя стужа, капель, летняя прохлада, красное и белое каление, температуры, соответствующие здоровой норме и лихорадочному состоянию человека. В такой последовательности каждому телу в его состоянии может быть найдено вполне четкое место между более и менее нагретыми телами. Место на такой естественной шкале позволяло всегда сопоставительно сравнивать относительное количество содержащейся в теле энергии и способности тела воспринимать или отдавать энергию в качественном смысле, т.е. независимо от количественных характеристик: размеров, объема или веса тела.

Потребность в измерениях температуры с познавательной целью возникла лишь в середине XVI в. Чтобы производить такие измерения, можно было воспользоваться любой известной из наблюдений зависимостью какого-нибудь параметра от температуры. Еще Герону Александрийскому было известно свойство воздуха расширяться при нагревании, чем он объяснял стремление огня вверх. Изменение объема с изменением температуры при постоянном давлении у газов, в частности у воздуха, выражено более сильно, чем у жидких и твердых тел. На этой основе в 1592 г. Галилеем был предложен для сравнительных температурных исследований термоскоп, который состоял из стеклянного баллончика, заполненного воздухом и сообщающегося тонкой трубкой с сосудом, в котором была закрашенная жидкость (вода или спирт). Изменение температуры воздуха в баллончике сопровождалось изменением уровня закрашенной жидкости в трубке. Существенным недостатком этого первого из известных термометров являлась чувствительность к изменению атмосферного давления.

В 1631 г. французский врач Ре описал термометр, действие которого было основано на использовании расширения воды. Конструкция термометра, подобного распространенным теперь жидкостно-стеклянным, создана в 1654 г. Его появление связывают с именем ученика Галилея — герцога тосканского Фердинанда II. Термометр представлял собой герметически запаянный сосуд с вертикальным указательным капилляром. В качестве рабочей жидкости использовался винный спирт. Сохранились сведения о том, что при снегопаде он показывал 20, а в самый знойный день — 80 градусов. Деления градусов были нанесены эмалевыми капельками прямо на трубку капилляра. В создании этих термометров, очевидно, значительную роль сыграли всемирно известные своим мастерством флорентийские стеклодувы.

Метрологическую основу термометрии заложил падуанский врач Санкторио. Используя термоскоп Галилея, он ввел две абсолютные точки и регламентировал систему проверки, согласно которой все флорентийские термометры градуировались по образцовому санкторианскогалилеевскому прибору. Значения фиксированных точек не сохранились. Известно, что флорентийские термометры удовлетворяли основному метрологическому требованию: в одинаковых условиях — одинаковые показания. Флорентийские термометры сразу же нашли широкое применение в метеорологических измерениях; из летописей можно установить, что точка таяния льда соответствовала 13,5 градусам флорентийской шкалы.

В начале XVIII в. зарегистрирован ряд предложений, направленных на привязку термометрической шкалы к нескольким легко и на-

дежно воспроизводимым точкам, которые в дальнейшем получили на именование реперных. В 1701 г. Ньютон предложил связать шкалу с температурами таяния льда и тела человека. Выбор последней был обусловлен описанием происхождения человека «по образу и подобию» в библии — самом официальном документе того времени.

В 1703 г. французский академик Амонтон, основываясь на том, что теплота представляет собой одну из форм движения, пришел к выводу, что нулевая точка температурной шкалы должна соответствовать состоянию, при котором прекратится всякое движение частиц. Он полагал, что при этом частицы будут занимать наименьший объем или, в случае газа, оказывать наименьшее возможное давление на ограничивающие стенки. Амонтон впервые предпринял попытку определить положение абсолютного нуля относительно точки таяния льда.

Гданьскому стеклодуву Фаренгейту человечество обязано началом серийного производства термометров и выбором в качестве рабочей жидкости ртути (1714 г.). В шкале Фаренгейта уже достаточно определенно воспроизведены три фиксированные точки. Температура тела здорового человека принималась равной 12 градусам; промежуточная температура таяния чистого льда, согласно измерениям, оказалась равной 4 градусам. Градусы Фаренгейта получились вначале неудобно большими. Для более тонких отсчетов Фаренгейт трижды последовательно делил их пополам, что привело к восьмикратному уменьшению единицы. При этом температура таяния льда стала равной 32 градусам, а температура тела человека — 96 градусам. Температура таяния льда в те времена предполагалась ненадежной, поскольку уже были известны случаи переохлаждения жидкостей. Температура кипения воды была вначале величиной производной и равной 212 градусам. Фаренгейт провел изыскания надежных фиксированных точек шкалы и установил, что температура смеси льда с водой стабильна при значительной вариации внешних условий, а температура кипения воды зависит от барометрического давления. Шкала Фаренгейта получила широкое распространение. В 1736 г. точки замерзания и кипения воды при фиксированном барометрическом давлении были приняты в качестве основных для всех шкал.

Около 1760 г. Ламберт, немецкий астроном, оптик и зодчий, пришел к выводу о достаточности в абсолютной шкале одной фиксированной точки. Второй такой точкой должен быть абсолютный ноль. Температура таяния льда была выбрана равной 1000 градусов, при этом температура кипения воды получалась величиной производной и равной 1370 градусам. Несмотря на очевидные достоинства, практического применения шкала Ламберта не получила.

После установления фиксированных точек шкалы естественно возникли вопросы интерполяции, что привело к тщательным исследованиям стекол и термометрических жидкостей. Наблюдения, проведенные на термометрах из одинакового стекла, которые заполнялись водой, маслом, спиртами, ртутью, показали различный ход мениска уровня жидкости при промежуточных температурах. В этих исследованиях была обнаружена температурная инверсия плотности воды при 4° С.

Одно из первых предложений метрологической основы интерполяции было сделано пизанским профессором Ренальдини в 1694 г. Оно состояло в том, что промежуточное значение показаний термометра определялось пропорциональным долям смеси, составленной из кипящей воды и воды, слитой с тающего льда. При очевидных принципиальных достоинствах практическая реализация такого метода оказалась связанной с непреодолимыми трудностями.

Шведский математик и геодезист Цельсий в 1742 г. предложил разбить в ртутном термометре диапазон между точками кипения воды и таяния льда на 100 равных частей. В этой шкале точка плавления льда соответствовало 100 градусам, а точке кипения воды — 0. В 1750 г. шкала была «обращена» одним из сотрудников и учеников Цельсия — Стрёмером. Подобная шкала с нулем при кипении воды и 150 градусами при ее замерзании была предложена ранее, в 1740 г., французским академиком Ислем. Смысловая основа такого обращенного представления утеряна.

До начала XX в. наравне со стоградусной шкалой Цельсия была распространена шкала, предложенная в 1730 г. французским зоологом и физиком Реомюром для термометров, заполненных 80 %-ным водным раствором этилового спирта. В шкале Реомюра система деления на градусы была принята такой же, как во флорентийском термометре: один градус соответствовал изменению объема жидкости на одну тысячную долю. За начало отсчета Реомюр принял температуру тающего льда, температура кипения воды соответствовала 80 градусам.

В начале XIX в. в поисках «абсолютного» метрологического прибора вернулись к идее газового термометра. Открытые к тому времени законы Гей-Люссака и Шарля позволяли предполагать, что в газовых термометрах показание не будет зависеть от вида газового заполнения. Однако при дальнейшем уточнении методов измерения в газах были обнаружены существенные индивидуальные отклонения. Тщательные исследования французского физика Ренью показали, что коэффициенты расширения газов зависят от плотности и степени удаления по температуре от состояния сжижения. Повышение температуры и снижение давления приближают газы к идеальным. Так, при 320 °C и нормальном давлении Ренью не удалось обнаружить разницы в показаниях газовых термометров, заполненных водородом, воздухом и углекислым газом. В подобных условиях сернистый газ отличался от водорода не только значением коэффициента, но и непостоянством этой величины. Ренью установил, что с понижением давления это различие становится менее заметным. Таким образом, деление температурной шкалы не получило желательной обоснованности вплоть до конца XIX в.

Сравнительные измерения показали, что в основном диапазоне 0—100 °C показания водородного термометра систематически ниже, чем показания термометров, заполненных другими газами. За пределами фундаментального диапазона показания термометра были тем выше, чем легче газ. В точках 0 и 100 °C показания всех термометров приводились к одинаковым условиям.

Одновременно с чисто экспериментальными исследованиями проводились и теоретические поиски незыблемой шкалы. В этом отношении заманчиво было воспользоваться функцией Карно, которая не зависит от вещества и является функцией одной только температуры.

В 1848 г. английский физик Томсон (Кельвин) предложил выбрать градус температурной шкалы таким образом, чтобы в его пределах эффективность идеальной тепловой машины была одинаковой, т. е. чтобы значение температуры принималось пропорциональным значению функции Карно. Такая температура была бы объективным мерилom эффективности тепловой энергии. Проведенные на основании экспериментальных данных Ренью расчеты упругости водяного пара дали температурную шкалу, настолько отличавшуюся от привычных шкал газовых и жидкостных термометров, что она не получила распространения. В дальнейшем Томсон обратил внимание на то, что привычная температура достаточно близко следует за величиной, обратной функ-

ции Карно. Обратная функция Карно и была предложена в качестве основы для абсолютной температурной шкалы в 1854 г. Прямое осуществление такой шкалы посредством идеальной тепловой машины, способной работать на сравнительно малых перепадах в широком диапазоне температур, практически неосуществимо. В 1862 г. Томсон совместно с английским физиком Джоулем разработали экспериментальный метод оценки отклонения реального газа от идеального (эффект Джоуля — Томсона). Первые же исследования эффекта Джоуля — Томсона на различных газах показали, что значения температур по шкале воздушного термометра при нормальном давлении несущественно отклоняются от абсолютной термодинамической шкалы, а по шкале водородного термометра отклонения пренебрежимо малы.

На основании исследований Джоуля и Томсона с учетом известных данных о неидеальности различных газов в 1887 г. Международным комитетом мер и весов было принято решение об утверждении в качестве температурного эталона водородного термометра постоянного объема (плотности) с начальным давлением (при 0 °C) 1 м рт. ст. и столбодным равномерным по давлению делением шкалы в промежутке между точками таяния льда и кипения воды при нормальном давлении. Неудобный в обращении водородный термометр был заменен эталонированными ртутными термометрами. Проведенные исследования показали, что максимальный разброс показаний ртутных эталонированных термометров из вередура различных плавок при 50 °C не превышает 0,02 К.

В 1906 г. Штоком и Нильсеном был предложен термометр с использованием упругости паров насыщения. В середине XX в. такие термометры широко применялись на транспорте, в частности автомобильном. Затем их вытеснили биметаллические термовибрационные элементы. В настоящее время принцип измерения температуры по давлению насыщенных паров используется лишь в лабораторной практике в области низких температур.

В 1827 г. немецкий физик Ом обнаружил зависимость электрического сопротивления различных проводников от их температуры. Первый термометр сопротивления был изготовлен немецким физиком Сименсом в 1871 г. для измерения температуры в печах. Платиновые термометры сопротивления нашли применение в качестве прецизионного инструмента после обстоятельных исследований английского физика Каллендера (1886 г.).

Существование металлов с настолько слабо выраженной зависимостью сопротивления от температуры, что ею можно пренебречь (для константана она примерно в 100 раз меньше, чем для платины, серебра и меди), позволяет реализовать эффективный абсолютный инструмент для прецизионных измерений, включая метрологические. Значительным вкладом в повышение чувствительности таких приборов явилось применение полупроводников. Температурный коэффициент полупроводниковых элементов на порядок выше, чем коэффициент чистых металлов. В 1948 г. фирма «Дженерал электрик» (США) выпустила первую партию таких приборов, назвав их термисторами.

В 1821 г. немецкий физик Зеебек открыл термоэлектрический эффект и указал на возможность использования этого эффекта для измерения температуры. Практические измерения на основе термоэлектричества были проведены лишь в конце XIX в. почти одновременно и независимо друг от друга французскими физиками Беккерелем и Ле-Шателье в 1887 г., Барусом в 1889 г. Большой промежуток времени между открытием эффекта и его применением для измерения температуры объясняется досадным недоразумением, связанным с ошибочными публикациями Реньо. Авторитетное утверждение Реньо

вызвало недоверие к первому опыту термоэлектрического измерения температуры, проведенному еще в 1836 г. французским физиком Пулье.

Обстоятельные исследования позволили выбрать около десятка термоэлектродных материалов, имеющих практически прямолинейные температурные характеристики. Особое преимущество термопар состоит в возможности измерения практически в точке. Объем спая термопар во много раз меньше резервуара ртутного термометра, поэтому они нашли широкое применение как в промышленной, так и (особенно) в лабораторной исследовательской практике. В настоящее время подавляющее большинство температурных измерений проводится посредством термопар.

Во второй половине XIX в. применение вероятностно-статистического подхода позволило на новой основе получить многие теоретические результаты. Из них для термометрии важными оказались обобщение законов излучения, полученное Планком, и фундаментальное уравнение Найквиста, связывающее основные параметры шумовых явлений. Эти результаты, наряду с идеальным газовым термометром, могут служить основой для абсолютной термодинамической шкалы. Последующее развитие вероятностно-статистического метода привело к возникновению понятий о неравновесных и отрицательных абсолютных температурах.

Температура является интенсивным параметром. Остальные пять основных метрологических параметров (длина, масса, время, единицы силы света и количества электричества) по своей природе экстенсивны и обладают свойством суперпозиции. Сложение и деление основной единицы, например килограмма, обеспечивает надежную метрологическую основу измерения массы при произвольно больших и малых значениях измеряемой величины. Температура таким свойством суперпозиции не обладает, и это всегда вносило большие трудности в проведение измерений.

Для практических целей наряду с теоретической термодинамической шкалой вводились шкалы, связанные с определенной системой реперных точек и средств реализации интерполяции. В 1889 г. Первая международная конференция мер и весов утвердила «Нормальную водородную шкалу». Последующие коррективы в редакции температурных шкал вносились после тщательной предварительной подготовки на международных официальных собраниях в 1927, 1948 и 1968 гг. В настоящее время действует Международная практическая температурная шкала (1968 г.), сокращенно обозначаемая МПТШ-68:

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1. Температурные шкалы

Температура, относящаяся к категории интенсивных физических величин, требует для своего измерения наличия не только единицы измерения, но и «шкалы», по которой «отсчитывается» значение измеряемого уровня. Единица измерения определяет масштаб такой шкалы.

Температура не поддается прямому измерению, и всякий прибор, предназначенный для ее измерения, преобразует температуру в другую, легко измеряемую физическую величину, используя однозначную связь с температурой выбранного физического (термометрического) свойства вещества.

Под термином **температурная шкала** принято понимать непрерывную совокупность чисел, линейно связанных с численными значениями какого-либо удобно и достаточно точно измеряемого физического свойства, являющегося однозначной и монотонной функцией температуры. Принцип построения температурной шкалы следующий. Выбирают какие-либо две основные или опорные точки, представляющие собой легко воспроизводимые температуры, неизменность которых обоснована общими физическими соображениями, например, температуры кипения или затвердевания чистых веществ. Этим температурам приписывают произвольные числовые значения t_1 и t_2 . Температурный интервал $t_2 - t_1$ часто называют основным интервалом температурной шкалы. Его делят на некоторое целое число N раз и $1/N$ часть основного интервала принимают за единицу измерения температуры или за масштаб шкалы, экстраполируемой в одну или обе стороны от основного интервала.

Далее выбирают **термометрическое свойство** E . (В качестве термометрического свойства в начальную эпоху развития термометрии использовалось объемное тепловое расширение жидкости в твердой оболочке.) Это свойство условно принимают линейно связанным с температурами, т.е. полагают справедливым равенство

$$dt = k dE, \quad (2.1)$$

где k — коэффициент пропорциональности. Интегрируя (2.1), получают

$$t = kE + C. \quad (2.2)$$

Для определения постоянных k и C используют выбранные выше температуры t_1 и t_2 , для которых экспериментально находят соответствующие значения E_1 и E_2 . Тогда вместо (2.2) можно записать

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{E_2 - E_1} (E - E_1). \quad (2.3)$$

Выражение (2.3) называется **уравнением шкалы**. С помощью этого уравнения (при условии, что допущение о справедливости (2.1) остается правомерным) по измеренному значению E рассчитывается значение температуры t .

Исследования показывают, что в природе не существует физических свойств, связанных линейно с температурой. Коэффициент k в (2.1) для любого термометрического свойства сам является функцией температуры, причем для разных свойств вид этой функциональной зависимости различен. Следовательно, описанным методом можно построить столько шкал, сколько выбрано термометрических свойств. Совпадая друг с другом в основных точках t_1 и t_2 , эти шкалы дают расходящиеся значения температур как внутри интервала $t_1 - t_2$, так и вне его.

2.2. Термодинамическая температура

Недостатки «эмпирических» шкал заставили отказаться от использования конкретных термометрических свойств и искать способ построения шкалы, независимой от свойств конкретных веществ. Решение задачи было найдено на основе свойств идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно.

Цикл Карно описывает изменение состояния определенной массы газа, заключенного в цилиндре с поршнем. Цилиндр окружен тепловой изоляцией и может приводиться в тепловой контакт с нагревателем

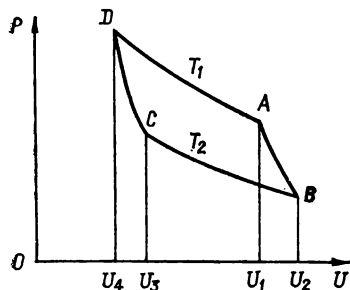


Рис. 2.1. Изменение состояния газа в процессе реализации цикла Карно.

в тепловой контакт с нагревателем с температурой T_1 и холодильником с температурой T_2 . Изменение состояния газа в процессе цикла схематично представлено на диаграмме PV (рис. 2.1). Начальное состояние газа, например в точке A , характеризуется значениями P_1 , V_1 и T_1 его параметров. С помощью поршня создается адиабатическое (без теплообмена с внешней средой) расширение газа, за счет чего его температура снижается до значения T_2 . Объем газа принимает значение V_2 (точка B диаграммы). Газ приводится в контакт с холодильником, температура которого T_2 , медленно сжимается

поршнем, причем выделяющееся при сжатии тепло передается холодильнику. Изотермический при температуре T_2 процесс сжатия продолжается, пока объем газа не достигнет значения V_3 (точка C диаграммы). В этот момент холодильник отключается, и при дальнейшем адиабатическом сжатии газа его температура повышается до значения T_1 . Объем газа принимает значение V_4 (точка D диаграммы). Здесь подключается нагреватель и газ изотермически расширяется с температурой T_1 до возврата в точку A диаграммы. Объем газа принимает исходное значение V_1 . Цикл завершен.

Коэффициент полезного действия такой идеальной тепловой машины определяется выражением

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (2.4)$$

где Q_1 — количество тепла, отданное нагревателем рабочему телу (газу), а Q_2 — количество тепла, отданное рабочим телом холодильнику. Так как цикл Карно построен на законах термодинамики, то и температуры, входящие в выражение (2.4), получили название термодинамических.

Согласно (2.4) коэффициент полезного действия идеальной тепловой машины определяется только значениями температур ее нагревателя T_1 и холодильника T_2 и не зависит от направления прохождения цикла и, что самое важное, не зависит от свойств рабочего тела. Это свойство коэффициента полезного действия цикла Карно навело в середине XIX в. на мысль об использовании законов термодинамики для осуществления «эталонной» шкалы температур.

Можно показать, что температура, входящая в уравнение Клапейрона состояния идеального газа

$$PV = RT, \quad (2.5)$$

является также термодинамической. В законе Шарля

$$p_t = p_0 (1 + \gamma t), \quad (2.6)$$

определяющем изменение давления идеального газа (при постоянном объеме), термодинамическая температура t отсчитывается от некоторого уровня T_0 . Аналогичная по форме связь устанавливается для изменения объема идеального газа при постоянном давлении законом Гей-Люссака:

$$v_t = v_0 (1 + \gamma t). \quad (2.7)$$

Физический смысл коэффициента γ в (2.6) и (2.7) становится ясным из следующих соображений. По мере понижения температуры t давление газа p_t согласно (2.6) убывает. Можно определить такое значение t_0 , при котором $p_t = 0$. Из (2.6) очевидно, что $t_0 = -1/\gamma$. t_0 принято называть абсолютным нулем температур. Так как значения t отсчитывались от некоторого уровня T_0 термодинамической температуры, то $T_0 = 1/\gamma$.

Для реальных газов (2.6) и (2.7) принимают вид

$$p_t = p_0 (1 + \alpha_p t), \quad (2.6')$$

$$v_t = v_0 (1 + \alpha_v t), \quad (2.7')$$

где α_v и α_p зависят как от давления газа, так и от его температуры. По мере снижения давления свойства реальных газов приближаются к свойствам идеальных и $\lim_{p \rightarrow 0} \alpha_v = \lim_{p \rightarrow 0} \alpha_p = \gamma$.

2.3. Газовые термометры

Реализация идеального цикла Карно на практике затруднена. Поэтому для построения термодинамической шкалы целесообразно использовать физические законы, в которые входит термодинамическая температура, например уравнение Клапейрона (2.5).

Созданные для этой цели приборы, в которых в качестве рабочего тела используется какой-либо определенный газ, называются газовыми термометрами. Газовые термометры создают либо с постоянным объемом рабочего резервуара, либо постоянного давления. В первом случае в зависимости от изменения температуры изменяется давление газа (уравнение (2.6')), а во втором — изменяется объем газа (уравнение (2.7')). Более точные результаты дает газовый термометр постоянного объема.

Схема газового термометра представлена на рис. 2.2. Рабочий резервуар, изготовленный из материала, устойчивого в том диапазоне температур, на который рассчитан термометр, заполняется рабочим газом. Тонким капилляром резервуар соединен с пространством над поверхностью ртути в коротком колене манометра. С помощью специального устройства, либо визуального, либо емкостного, ртуть в коротком колене перед отсчетом устанавливается под пробкой с одним и тем же зазором, что обеспечивает постоянство объема рабочего газа. Давление рабочего газа определяется по высоте мениска столба ртути в длинном колене манометра, отсчитываемой по шкале. Уровень ртути в коротком колене манометра устанавливается с помощью поршенька и вспомогательного резервуара. Система заполняется рабочим газом через трубку после предварительного опускания ртути в длинном и коротком коленах.

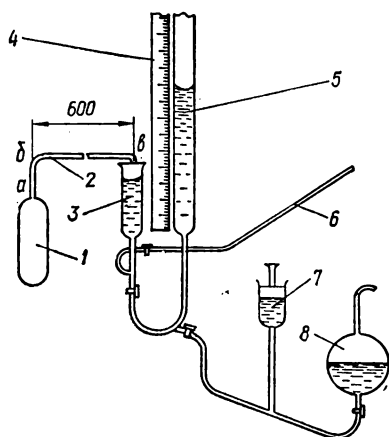


Рис. 2.2. Принципиальная схема газового термометра:

1 — рабочий резервуар; 2 — капилляр; 3 — короткое колено манометра; 4 — шкала; 5 — длинное колено манометра; 6 — трубка; 7 — поршень; 8 — вспомогательный резервуар.

что и резервуар, подвергают специальному исследованию с целью установления возможно более точной формулы, определяющей зависимость коэффициента его линейного расширения от температуры.

Выбор рабочего газа также определяется областью температур, для которой предназначен термометр: для низких температур — гелий, позволяющий нижний предел измеряемых температур снизить до $T = 10$ К, для высоких — азот, менее чем гелий диффундирующий при высоких температурах через стенки резервуара. Использование реальных газов требует введения поправок в показания газового термометра для приведения их к термодинамическим температурам. Эти поправки рассчитываются на основании заранее тщательно проведенных исследований отклонений свойств данного газа от законов идеальных газов.

Таким образом, газовый термометр является инструментом, с помощью которого может практически измеряться термодинамическая температура.

Кроме поправок на тепловое расширение резервуара и отклонение свойств использованного рабочего газа от закона идеального газа

Для низких температур удобно применять рабочий резервуар из красной меди, обеспечивающий выравнивание температур во всем объеме газа; для средних температур — стеклянные резервуары, для высоких температур — резервуары из сплавов платины и иридия или платины и родия, обеспечивающие хорошую газонепроницаемость до температуры 1100°C . Для высоких температур используются также резервуары из плавленого кварца.

Тепловое расширение материала резервуара в широком интервале температур вызывает изменение рабочего объема газа. Поэтому для внесения соответствующих поправок либо сам резервуар, либо образец, изготовленный из того же материала,

в показания газowego термометра необходимо вводить еще целый ряд других поправок: поправка на величину «вредного» объема термометра, состоящего из объема капилляра и объема, заключенного в коротком колене манометра между мениском ртути и пробкой; поправка на температуру газа в отдельных частях этого вредного объема; поправка на температуру ртути в коротком и длинном коленах манометра; поправка на температуру шкалы и др.

Для получения необходимой точности измерения термодинамических температур постановка газотермических измерений требует тщательного учета влияния многих факторов и может быть надлежащим образом выполнена только в крупных метрологических лабораториях.

2.4. Термодинамическая шкала температур

Термодинамическая температурная шкала, осуществляемая с помощью газовых термометров, базировалась на двух основных (реперных) точках: температуре равновесия между льдом и водой (точка таяния льда) и температуре равновесия между водой и ее паром при нормальном атмосферном давлении (точка кипения воды). Первой точке условно приписывалась цифра 0 (точно), а второй — цифра 100 (точно). Интервал температур между этими основными точками делился на 100 равных частей, и одна сотая интервала получила название градуса как единицы измерения термодинамической температуры или масштаба термодинамической температурной шкалы. Из (2.5) при $V = \text{const}$

непосредственно вытекает, что $\frac{P_{100} - P_0}{P_0} = \frac{T_{100} - T_0}{T_0}$, а для любых значений температур $P/P_0 = T/T_0$.

В 1927 г. на VII Генеральной конференции по мерам и весам принято решение о том, что все измерения температур во всем мире должны, в конечном счете, приводиться к термодинамической шкале.

Исследования показали, что воспроизводимость основных точек шкалы — точки таяния льда и точки кипения воды — не может быть достигнута лучше 0,001 К, и это обстоятельство накладывает ограничения на выяснение необходимого дальнейшего повышения точности измерения термодинамических температур.

В 1967 г. принято новое определение единицы измерения температуры, названной кельвин (символ К): кельвин определяется как $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды. Тройная точка воды представляет собой температуру равновесия трех фаз — твердой, жидкой и газообразной чистой воды естественного изотопического состава. Она принята равной 0,01 °С, т.е. на 0,01 К выше точки таяния льда, которая теперь исключена из числа основных и определяется через тройную точку воды.

Таким образом, новое определение единицы температуры предусматривает использование только одной практически реализуемой реперной точки. Вторая необходимая реперная точка — теоретическая — абсолютный нуль.

Воспроизводимость тщательно подготовленной тройной точки воды составляет 0,0002 К. Лучшая воспроизводимость тройной точки воды по сравнению с точкой таяния льда и отсутствие влияния погрешностей при воспроизведении второй основной точки привели к более точному установлению единицы температуры по новому ее определению.

Символ К употребляется при числовых значениях температур, отсчитанных от абсолютного нуля, разностей температур и в формулах размерностей. Правомерно там, где это удобно, выражать темпе-

ратуры в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) в соответствии с соотношением $T [\text{K}] = t [^{\circ}\text{C}] + 273,15$. Кельвин — одна из основных единиц международной системы СИ.

2.5. Тепловое излучение

Тело, которое поглощает всю падающую на него энергию, называется абсолютно черным. Такие тела в природе не существуют, но модель черного тела можно осуществить с достаточной степенью приближения. Излучение АЧТ описывается формулой Планка

$$M_{\lambda, T}^0 = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/(\lambda T)} - 1)^{-1},$$

где $M_{\lambda, T}^0$ — плотность излучения; λ — длина волны излучения; T — абсолютная температура излучателя; C_1, C_2 — постоянные излучения.

На формуле Планка основывается один из способов воспроизведения термодинамической шкалы температур. Для этой цели из спектра излучения, испускаемого АЧТ, с помощью соответствующей аппаратуры выделяется достаточно узкий спектральный интервал шириной $\Delta\lambda$ и длиной волны λ в середине интервала. Черное тело помещается в термостат с известной термодинамической температурой T_{00} и измеряется его излучение $M_{\lambda, T_{00}}^0$. Температура термостата с АЧТ изменяется и достигает некоторого значения T . При этом плотность излучения АЧТ для длины волны λ равна $M_{\lambda, T}^0$. Используя формулу Планка, получаем

$$\frac{M_{\lambda, T}^0}{M_{\lambda, T_{00}}^0} = \frac{e^{C_2/(\lambda T_{00})} - 1}{e^{C_2/(\lambda T)} - 1}.$$

Таким образом, измеренное отношение монохроматических интенсивностей излучения АЧТ $M_{\lambda, T}^0/M_{\lambda, T_{00}}^0$ однозначно определяет соотношение между двумя термодинамическими температурами T_{00} и T . Реализуя ряд дискретных значений T_1, T_2, \dots и измеряя соответствующие им отношения $M_{\lambda, T_1}^0/M_{\lambda, T_{00}}^0, M_{\lambda, T_2}^0/M_{\lambda, T_{00}}^0, \dots$, получают точки термодинамической шкалы температур. Такая шкала требует для своего осуществления только одну, условно принятую за основную, температуру T_{00} и теоретически может быть реализована в любой области спектра и в любом интервале температур.

Для области коротких длин волн спектра формула Планка переходит в спектральную формулу Вина:

$$M_{\lambda, T}^0 = \frac{C_1}{\lambda^5 e^{C_2/\lambda T}}.$$

При $\lambda T > 3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ погрешность определения плотности излучения не превышает 1 %. В этом случае получаем значительно более простое выражение для построения шкалы термодинамических температур:

$$\ln \frac{M_{\lambda, T}^0}{M_{\lambda, T_{00}}^0} = \frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_{00}} - \frac{1}{T} \right),$$

которое широко используется в оптической пирометрии.

2.6. Термошумовая термометрия

Флуктуации скоростей носителей зарядов в проводниках, обусловленные их тепловым хаотическим движением, приводят к тому, что на концах активного сопротивления создаются случайные пульсации напряжения. Амплитудные значения этого напряжения подчиняются нормальному закону распределения с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, зависящей от температуры проводника. Такие пульсации напряжения называются **тепловым шумом**.

Теория теплового шума основывается на теории флуктуаций, развитой М. Смолуховским и А. Эйнштейном. Используя выводы последней теории, С. Найквист пришел к следующей формуле, определяющей среднеквадратичное значение шумового напряжения u :

$$\bar{u}^2 = 4kTR\Delta f, \quad (2.8)$$

где k — постоянная Больцмана; T — термодинамическая температура проводника; R — его электрическое сопротивление; Δf — ширина полосы частот, в которой осуществляются измерения. Таким образом, среднеквадратичное значение напряжения теплового шума прямо пропорционально термодинамической температуре проводника и может служить мерой этой температуры*. Из-за малых величин напряжения шума u измерения производятся с помощью усилителя, собственные шумы которого $u_{\text{ш}}$ должны быть значительно меньше измеряемых.

Получил распространение нулевой метод измерения: выпрямленное значение \bar{u}^2 , которое снимается с сопротивления R_0 , находящегося при фиксированной температуре T_0 , изменением R_0 уравнивалось с выпрямленным значением \bar{u}_x^2 , которое снимается с сопротивления R_x , находящегося при измеряемой температуре T_x . Тогда из (2.8) следует, что $T_x/T_0 = R_x/R_0$. Значения электрических сопротивлений R_0 и R_x не должны изменяться с изменением температуры. В той или иной степени это требование удовлетворяется выбором соответствующего материала сопротивлений, имеющего малый температурный коэффициент, либо комбинацией двух сопротивлений, имеющих разные по знаку температурные коэффициенты.

Измерение интенсивности теплового шума путем счета за определенный интервал времени количества импульсов напряжения, амплитуды которых превышают заданное заранее ограничивающее напряжение $u_{\text{пор}}$, реализовано в работе А. Д. Бродского. Возможность практического осуществления измерения температуры методом амплитудной дискриминации и счета шумовых импульсов иллюстрируется рис. 2.3.

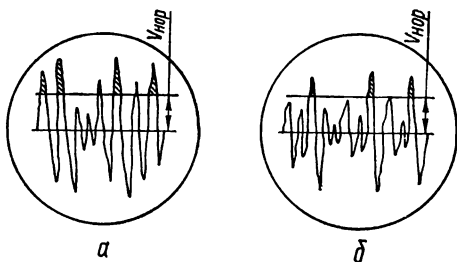


Рис. 2.3. Реализация случайного процесса тепловых шумов при двух температурах:

$a - T_1$; $b - T_2$; $T_1 > T_2$.

* Первая работа, посвященная использованию теплового шума для измерения температуры, опубликована в 1946 г. Аппаратурная реализация идеи, изложенной в этой работе, осуществлена в 1949 г. созданием абсолютного термометра до 1000 °С с погрешностью $\pm 0,1 \%$.

где приведены две реализации случайного процесса тепловых шумов при двух температурах. Этот метод позволяет измерять термодинамические температуры со средним квадратическим отклонением, не превышающим 0,01 К.

2.7. Магнитная термометрия

Значения термодинамических температур вблизи абсолютного нуля получают с помощью магнитной термометрии. Для измерения температур магнитными методами используют температурные зависимости магнитных свойств соответствующим образом подобранных магнитных солей. Обычно используется температурная зависимость магнитной восприимчивости (активной и реактивной составляющих), а также индуктивности и остаточного магнитного момента соли.

При измерениях магнитной восприимчивости выбираются соли, χ которых в заданной температурной области подчиняется закону Кюри — Вейсса: магнитная восприимчивость 1 см^3 данного вещества связана с «магнитной» температурой T^* выражением

$$\chi = \frac{c}{T^* - \Delta}, \quad (2.9)$$

где c — постоянная Кюри, $c = \frac{\tau f}{3}$. В последней формуле f — коэффициент заполнения, равный отношению плотности порошка соли к плотности кристалла d :

$$\tau = 1,488 \frac{d}{M} s(s+1).$$

Отношение $\frac{d}{M}$ пропорционально числу магнитных ионов в 1 см^3 , а величина $s(s+1)$ пропорциональна квадрату магнитного момента одного иона соли. Поправка определяется формулой

$$\Delta = \frac{f\tau}{3} \left(\frac{4}{3} \pi - \alpha_B \right),$$

где α_B — коэффициент размагничивания, определяемый формой образца. Для однородного кристалла сферической формы, намагниченного в однородном поле, $\alpha_B = \frac{4\pi}{3}$ и, следовательно, $\Delta = 0$.

«Магнитная» температура T^* связана с термодинамической температурой соотношением

$$T^* = \frac{T}{\gamma} + Q \frac{\tau^2}{9} \frac{\gamma}{T}. \quad (2.10)$$

Здесь γ — квантовомеханический поправочный коэффициент, зависящий от температуры и близкий к единице. Второй член в выражении (2.10) в области «магнитных» температур обычно очень мал.

При $T > 1 \text{ К}$ большинство парамагнитных солей в слабых магнитных полях подчиняется закону Кюри: $M = cH/T$. В этой области магнитная температура совпадает с термодинамической. При более низких температурах T^* отличается от T , и разность их значений возрастает по мере приближения к области максимума магнитной восприимчивости (сотых долей кельвина). Отклонения от закона Кюри появляются вследствие взаимодействий в кристаллической решетке. В температурной области, где влияние взаимодействия еще незначительно, разность между T и T^* можно вычислить теоретически.

Учитывая отклонение формы образца соли от сферической, возможную неоднородность магнитного поля, целесообразно на участке применимости закона Кюри определить значения постоянных s и Δ в (2.9), рассматривая эту формулу как интерполяционную. В области значительных расхождений магнитной и термодинамической температур наилучшие результаты дает калориметрический метод, с помощью которого по известной энергии, вводимой в систему γ -излучением, и теплоемкости образца определяется изменение температуры. При этом влияние взаимодействий в кристаллической решетке учитывается расчетно.

В настоящее время техника учета всех влияющих факторов доведена до такого совершенства, что термодинамические температуры ниже 1 К измеряются магнитными методами с погрешностями, не превышающими 0,001 К.

2.8. Использование эффекта Джозефсона

Элемент Джозефсона состоит из двух сверхпроводниковых пластин, разделенных тонким слоем оксида. Элемент включается в измерительную схему с помощью точечного контакта между заостренным проводом и пластиной из сверхпроводящего материала.

В полупроводнике носители зарядов могут существовать в следующих формах: 1) в форме обычных электронов, рассеиваемых решеткой; 2) в форме куперовских пар, создающих сверхпроводимость материала, но не рассеивающихся решеткой. Вследствие туннельного эффекта как электрон, так и куперовские пары могут проходить через оксидный слой, что и является причиной возникновения следующих эффектов.

1. *Стационарный эффект Джозефсона.* Постоянный ток сверхпроводимости, не превышающий некоторой величины J_0 , может протекать через слой оксида, не создавая на нем никакого падения напряжения.

2. *Нестационарный эффект Джозефсона.* Если к элементу приложено постоянное напряжение смещения u_0 , то ток электронных пар совершает колебания с частотой $f_0 = \frac{2e}{h} u_0$. Таким образом, элемент становится генератором чисто синусоидального тока строго определенной частоты. При $u_0 = 1$ мкВ $f_0 = 483,6$ Гц. На этом эффекте базируется наиболее точный метод измерения напряжения постоянного тока u_0 путем измерения частоты f_0 .

Тепловые шумы, возникающие в элементе Джозефсона, создают пульсации протекающего через него тока, а это приводит к «размыванию» монохроматического частотного сигнала, присущего строго постоянному значению u_0 . Так как тепловой шум имеет нормальное распределение, то и уширение частотного сигнала создает типичный контур гауссовской кривой. Полуширина спектральной линии теплового шума на элементе Джозефсона, измеряемая радиоспектрометром, определяется выражением

$$\Delta f_0 = 4\pi k T r \left(\frac{2e}{h} \right)^2 \left(1 + \frac{Jr}{u_0} \right),$$

где T — термодинамическая температура элемента; r — сопротивление, шунтирующее элемент в измерительной схеме; J — сила тока, протекающего через элемент.

Термометр с элементом Джозефсона может работать только при температурах существования сверхпроводимости.

МЕЖДУНАРОДНАЯ ПРАКТИЧЕСКАЯ ТЕМПЕРАТУРНАЯ ШКАЛА

3.1. Основные положения

Сложность аппаратуры газового термометра, необходимость тщательной постановки каждого измерения с целью максимального учета возникающих погрешностей и, несмотря на это, недостаточно хорошая воспроизводимость измерений заставили уже в начале XX столетия искать другие способы воспроизведения термодинамической шкалы. К этому времени в крупнейших метрологических лабораториях мира накопился большой материал по определению газовыми термометрами термодинамических температур фазовых переходов веществ. Обобщение материала позволило разработать рекомендации, формулирующие условия эксперимента и обеспечивающие наилучшую воспроизводимость температур фазовых переходов.

В качестве опорных точек для построения практической шкалы были выбраны средние значения температур фазовых переходов, полученные, однако, по недостаточно надежным данным. Эти значения могли существенно отличаться от действительных термодинамических температур. Были выбраны также приборы для интерполирования между опорными точками и разработаны способы реализации таких приборов. Наконец, были согласованы методы и на их основе созданы приборы, позволяющие расширить температурную шкалу за пределы рабочего диапазона газовых термометров.

Согласно принятому специалистами решению, практическая шкала должна быть единой для всех стран мира и настолько близкой к термодинамической, насколько это позволяет уровень знаний того времени; по мере совершенствования наших знаний в практическую шкалу должны вноситься изменения, направленные на лучшее приближение ее к термодинамической.

Первое положение о Международной практической температурной шкале было принято как временное в 1927 г. на VII Генеральной конференции по мерам и весам. Оно подвергалось обсуждению и окончательно принято в 1933 г. на VIII Генеральной конференции по мерам и весам. В 1936, 1948, 1960 гг. в положение о МПТШ вносились изменения. Последним, наиболее существенным, изменениям положение о МПТШ подвергалось в 1968 г. Ниже приводятся выдержки из положения о МПТШ-68 в редакции 1975 г.

Международная практическая температурная шкала 1968 г. установлена таким образом, чтобы температура, измеряемая по ней, была близка к термодинамической температуре и разности между ними оставались в пределах современной погрешности измерений. Измерения в этой шкале выполняются достаточно легко и с высокой воспроизводимостью, в то время как прямые измерения термодинамической температуры весьма трудоемки и недостаточно точны.

В МПТШ-68 используются как международная практическая температура Кельвина (символ T_{68}), так и международная практическая температура Цельсия (символ t_{68}). Соотношение между T_{68} и t_{68} такое же, как и между T и t , т.е. $t_{68} = T_{68} - 273,15$ К. Единицами T_{68} и t_{68} являются кельвин (символ К) и градус Цельсия (символ °С), т.е. наименования единиц те же, что и для термодинамических температур T и t .

3.2. Определение Международной практической температурной шкалы [МПТШ-68]*

Принцип построения и основные реперные (постоянные) точки

МПТШ-68 основана на определенных значениях температур воспроизводимых равновесных состояний (основные реперные точки) и на эталонных приборах, градуированных при этих температурах (см. табл. 3.1). В интервалах между температурами реперных точек интерполяцию осуществляют по формулам, устанавливающим связь между показаниями эталонных приборов и значениями международной практической температуры.

Эталонным прибором, используемым в диапазоне температур от 13,81 К до 630,74 °С, является платиновый термометр сопротивления. Его чувствительный элемент изготавливают из свободной от напряжений отожженной чистой платиновой проволоки. Относительное сопротивление $W(T_{68})$ термометра, определяемое выражением $W(T_{68}) = R(T_{68})/R(273,15 \text{ К})$, не должно быть меньше 1,39250 при $T_{68} = 373,15$ К. Для диапазона температур ниже 0 °С соотношение между сопротивлением термометра и температурой определяется с помощью стандартной функции и специальных уравнений для вычисления поправок к этой функции, в диапазоне температур от 0 до 630,74 °С — двумя уравнениями в форме полиномов.

Эталонным прибором, используемым в диапазоне температур от 630,74 до 1064,43 °С, является термоэлектрический термометр с электродами из платинородия (10 % родия) и платины, соотношение между электродвижущей силой и температурой которого выражается уравнением второй степени.

Для диапазона температур выше 1064,43 °С (1337,58 К) МПТШ-68 определяется с помощью закона излучения Планка при использовании в качестве опорной температуры 1064,43 К (1337,58 К) и принятого значения константы $C_2 = 0,014388 \text{ м} \cdot \text{К}$.

Определение T_{68} в различных температурных диапазонах

Диапазон от 13,81 до 273,15 К. В этом диапазоне

$$W(T_{68}) = W_{\text{ССТ-68}}(T_{68}) + \Delta W_i(T_{68}),$$

* В этой шкале, как правило, используются температуры Кельвина ниже 0 °С и температуры Цельсия выше 0 °С, что позволяет избежать употребления отрицательных значений и совпадает с общепринятой практикой.

Таблица 3.1. Основные реперные (постоянные) точки МПТШ-68¹

Состояние фазового равновесия	Принятое значение международной практической температуры	
	T_{88} , К	t_{88} , °С
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (тройная точка равновесного водорода) ²	13,81	—259,34
Равновесие между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода при давлении 33 330,6 Па (25/76 нормальной атмосферы) ^{2,3}	17,042	—256,108
Равновесие между жидкой и парообразной фазами равновесного водорода (точка кипения равновесного водорода) ^{2,3}	20,28	—252,87
Равновесие между жидкой и парообразной фазами неона (точка кипения неона) ³	27,102	—246,048
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами кислорода (тройная точка кислорода)	54,361	—218,789
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами аргона (тройная точка аргона) ⁴	83,798	—189,352
Равновесие между жидкой и парообразной фазами кислорода (точка росы кислорода) ^{3,4}	90,188	—182,962
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами воды (тройная точка воды)	273,16	0,01
Равновесие между жидкой и парообразной фазами воды (точка кипения воды) ⁵	373,15	100
Равновесие между твердой и жидкой фазами олова (точка затвердевания олова) ⁵	505,1181	231,9681
Равновесие между твердой и жидкой фазами цинка (точка затвердевания цинка)	692,73	419,58
Равновесие между твердой и жидкой фазами серебра (точка затвердевания серебра)	1235,08	961,93
Равновесие между твердой и жидкой фазами золота (точка затвердевания золота)	1337,58	1064,43

¹ За исключением тройных точек и одной точки равновесного водорода (17,042 К) принятые значения температур даны для состояний равновесия при давлении $p_0 = 101\,325$ Па (1 нормальная атмосфера). В тех случаях, когда изотопный состав существенно влияет на температуру реперной точки, следует использовать изотопный состав, указанный в п. 3.5. ² Термин равновесный водород определен в п. 3.5. ³ Неопределенность состава, связанная с наличием различных изотопов и примесей, обуславливает использование точки кипения (исчезающе малая доля жидкости) для кислорода (см. п. 3.5) ⁴ Тройную точку аргона можно использовать наряду с точкой росы кислорода ⁵ Точку затвердевания олова $t = 231,9292$ °С можно использовать наряду с точкой кипения воды.

где $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ — относительное сопротивление, определяемое стандартной функцией:

$$T_{68} = \sum_{j=0}^{20} a_j \left(\frac{\ln W_{\text{CCT-68}}(T_{68}) + 3,28}{3,28} \right)^j \text{ К.} \quad (3.1)$$

Коэффициенты a_j даны в табл. 3.2. При $T_{68} = 373,15 \text{ К}$ $W_{\text{CCT-68}}(T_{68}) = 1,39259668$. Стандартная функция $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ при $T_{68} = 273,15 \text{ К}$ непрерывно переходит в функцию $W(t_{68})$, определяемую уравнениями (3.5) и (3.6) для $\alpha = 3,9259668 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ и $\delta = 1,496334 \text{ } ^\circ\text{C}$, следовательно, при этой температуре совпадают значения функций, а также их первых и вторых производных* (табл. 3.3).

Т а б л и ц а 3.2. Коэффициенты a_j стандартной функции для платиновых ТС в диапазоне температур от 13,81 до 273,15 К

j	a_j	j	a_j	j	a_j
0	38,59276	7	77,35767	14	179,54782
1	43,44837	8	—95,75103	15	700,42832
2	39,10887	9	—223,52892	16	29,48666
3	38,69352	10	239,50285	17	—335,24378
4	32,56883	11	524,64944	18	—77,25660
5	24,70158	12	—319,79981	19	66,76292
6	53,03828	13	—787,60686	20	24,44911

Поправки $\Delta W_t(T_{68})$ при температурах основных реперных точек получают из измеренных значений $W(T_{68})$ и соответствующих значений $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ (табл. 3.4). При промежуточных температурах используют интерполяционные формулы. Диапазон между 13,81 и 273,15 К разделен на четыре участка, в каждом из которых $\Delta W_t(T_{68})$ определяется полиномом от T_{68} . Коэффициенты полиномов находят из значений $\Delta W_t(T_{68})$ в реперных точках и из условий равенства производных $d\Delta W_t(T_{68})/dT_{68}$ на границах соседних температурных участков.

На участке от 13,81 до 20,28 К поправочная функция имеет вид

$$\Delta W_1(T_{68}) = A_1 + B_1 T_{68} + C_1 T_{68}^2 + D_1 T_{68}^3,$$

где константы определяются из значений поправок $\Delta W = W - W_{\text{CCT-68}}$, измеренных в тройной точке равновесного водорода, при температуре 17,042 К в точке кипения равновесного водорода, а также из значения первой производной поправочной функции в точке кипения равновесного водорода, вычисленного по уравнению (3.2).

На участке от 20,28 до 54,361 К поправочная функция имеет вид

$$\Delta W_2(T_{68}) = A_2 + B_2 T_{68} + C_2 T_{68}^2 + D_2 T_{68}^3, \quad (3.2)$$

где константы определяются из значений поправок $\Delta W = W - W_{\text{CCT-68}}$, измеренных в точке кипения равновесного водорода, в точке кипения

* Таблицу этой стандартной функции, достаточно подробную, чтобы осуществлять линейную интерполяцию с точностью до 0,1 мК, можно получить в Международном бюро мер и весов (Севр-92, Франция).

Таблица 3.3. Значения $W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$ при целочисленных значениях T_{68} , полученных в соответствии с уравнением (3.1)

T_{68}, K	$W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$	T_{68}, K	$W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$	T_{68}, K	$W_{\text{CCT-68}}(T_{68})$
13	0,001 230 63	63	0,126 939 14	113	0,342 227 69
14	0,001 459 74	64	0,131 111 86	114	0,346 508 02
15	0,001 745 42	65	0,135 303 64	115	0,350 785 17
16	0,002 094 75	66	0,139 512 87	116	0,355 059 14
17	0,002 515 12	67	0,143 738 04	117	0,359 329 93
18	0,003 014 29	68	0,147 977 72	118	0,363 597 55
19	0,003 599 62	69	0,152 230 60	119	0,367 862 01
20	0,004 277 80	70	0,156 495 43	120	0,372 123 32
21	0,005 054 94	71	0,160 771 07	121	0,376 381 49
22	0,005 936 68	72	0,165 056 44	122	0,380 636 54
23	0,006 928 05	73	0,169 350 52	123	0,384 888 49
24	0,008 033 15	74	0,173 652 39	124	0,389 137 36
25	0,009 255 05	75	0,177 961 17	125	0,393 383 17
26	0,010 595 85	76	0,182 276 04	126	0,397 625 94
27	0,012 056 90	77	0,186 596 26	127	0,401 865 69
28	0,013 639 02	78	0,190 921 11	128	0,406 102 45
29	0,015 342 62	79	0,195 249 93	129	0,410 336 25
30	0,017 167 67	80	0,199 582 13	130	0,414 567 11
31	0,019 113 64	81	0,203 917 13	131	0,418 795 06
32	0,021 179 46	82	0,208 254 41	132	0,423 020 13
33	0,023 363 45	83	0,212 593 49	133	0,427 242 34
34	0,025 663 36	84	0,216 933 90	134	0,431 461 73
35	0,028 076 45	85	0,221 275 23	135	0,435 678 32
36	0,030 599 53	86	0,225 617 10	136	0,439 892 14
37	0,033 229 13	87	0,229 959 15	137	0,444 103 22
38	0,035 961 58	88	0,234 301 04	138	0,448 311 59
39	0,038 793 05	89	0,238 642 47	139	0,452 517 29
40	0,041 719 69	90	0,242 983 17	140	0,456 720 33
41	0,044 737 61	91	0,247 322 86	141	0,460 920 75
42	0,047 842 92	92	0,251 661 33	142	0,465 118 58
43	0,051 031 77	93	0,255 998 34	143	0,469 313 85
44	0,054 300 35	94	0,260 333 69	144	0,473 506 58
45	0,057 644 87	95	0,264 667 22	145	0,477 696 81
46	0,061 061 59	96	0,268 918 74	146	0,481 884 56
47	0,064 546 82	97	0,273 328 12	147	0,486 069 86
48	0,068 096 93	98	0,277 655 20	148	0,490 252 74
49	0,071 708 34	99	0,281 979 88	149	0,494 433 23
50	0,075 377 58	100	0,286 302 04	150	0,498 611 35
51	0,079 101 22	101	0,290 621 57	151	0,502 787 12
52	0,082 875 95	102	0,294 938 40	152	0,506 960 59
53	0,086 698 57	103	0,299 252 43	153	0,511 131 76
54	0,090 565 98	104	0,303 563 60	154	0,515 300 67
55	0,094 475 19	105	0,307 871 85	155	0,519 467 34
56	0,098 423 37	106	0,312 177 13	156	0,523 631 80
57	0,102 407 77	107	0,316 479 38	157	0,527 794 06
58	0,106 425 83	108	0,320 778 58	158	0,531 954 16
59	0,110 475 06	109	0,325 074 68	159	0,536 112 11
60	0,114 553 15	110	0,329 367 66	160	0,540 267 95
61	0,118 657 89	111	0,333 657 50	161	0,544 421 68
62	0,122 787 20	112	0,337 944 18	162	0,548 573 33

Продолжение табл. 3.3

$T_{\text{рос}}, \text{K}$	$W_{\text{CCT-68}}(T_{\text{рос}})$	$T_{\text{рос}}, \text{K}$	$W_{\text{CCT-68}}(T_{\text{рос}})$	$T_{\text{рос}}, \text{K}$	$W_{\text{CCT-68}}(T_{\text{рос}})$
163	0,552 722 93	200	0,704 966 98	237	0,855 079 64
164	0,556 870 49	201	0,709 050 09	238	0,859 110 71
165	0,561 016 04	202	0,713 131 67	239	0,863 140 48
166	0,565 159 59	203	0,717 211 73	240	0,867 168 95
167	0,569 301 16	204	0,721 290 28	241	0,871 196 12
168	0,573 440 78	205	0,725 367 32	242	0,875 222 01
169	0,577 578 46	206	0,729 442 87	243	0,879 246 61
170	0,581 714 21	207	0,733 516 94	244	0,883 269 93
171	0,585 848 06	208	0,737 589 52	245	0,887 291 97
172	0,589 980 02	209	0,741 660 63	246	0,891 312 73
173	0,594 110 12	210	0,745 730 27	247	0,895 332 23
174	0,598 238 36	211	0,749 798 46	248	0,899 350 46
175	0,602 364 76	212	0,753 865 19	249	0,903 367 42
176	0,606 489 34	213	0,757 930 48	250	0,907 383 13
177	0,610 612 12	214	0,761 994 32	251	0,911 397 57
178	0,614 733 10	215	0,766 056 74	252	0,915 410 77
179	0,618 852 30	216	0,770 117 73	253	0,919 422 71
180	0,622 969 74	217	0,774 177 30	254	0,923 433 40
181	0,627 085 43	218	0,778 235 46	255	0,927 442 85
182	0,631 199 38	219	0,782 292 21	256	0,931 451 05
183	0,635 311 61	220	0,786 347 56	257	0,935 458 02
184	0,639 422 13	221	0,790 401 52	258	0,939 463 74
185	0,643 530 95	222	0,794 454 09	259	0,943 468 23
186	0,647 638 08	223	0,798 505 27	260	0,947 471 48
187	0,651 743 54	224	0,802 555 08	261	0,951 473 51
188	0,655 847 33	225	0,806 603 51	262	0,955 474 29
189	0,659 949 47	226	0,810 650 58	263	0,959 473 85
190	0,664 049 98	227	0,814 696 29	264	0,963 472 19
191	0,668 148 85	228	0,818 740 64	265	0,967 469 29
192	0,672 246 10	229	0,822 783 64	266	0,971 465 17
193	0,676 341 74	230	0,826 825 29	267	0,975 459 82
194	0,680 435 78	231	0,830 865 61	268	0,979 453 25
195	0,684 528 24	232	0,834 904 59	269	0,983 445 45
196	0,688 619 11	233	0,838 942 24	270	0,987 436 43
197	0,692 708 41	234	0,842 978 57	271	0,991 426 18
198	0,696 796 15	235	0,847 013 57	272	0,995 414 71
199	0,700 882 34	236	0,851 047 26	273	0,999 402 01

исона и в тройной точке кислорода, а также из значения первой производной поправочной функции в тройной точке кислорода, вычисленного по уравнению (3.3).

На участке от 54,361 до 90,188 К поправочная функция имеет вид

$$\Delta W_3(T_{\text{рос}}) = A_3 + B_3 T_{\text{рос}} + C_3 T_{\text{рос}}^2, \quad (3.3)$$

где константы определяются из значений поправок $\Delta W = W - W_{\text{CCT-68}}$, измеренных в тройной точке и в точке росы кислорода (или в тройной точке аргона, см. примечание 4 к табл. 3.1), а также из значения первой производной поправочной функции в точке росы кислорода, вычисленного по уравнению (3.4).

Таблица 3.4. Значения $W_{\text{CCT-68}}(T_{88})$ в соответствии с данными табл. 3.2 при температурах реперных точек

Реперная (постоянная) точка	$T_{88}, \text{ K}$	$t_{88}, ^\circ\text{C}$	$W_{\text{CCT-68}}$
Тройная точка равновесного водорода	13,81	-259,34	0,001 412 08
Точка 17,042 K равновесного водорода	17,042	-256,108	0,002 534 45
Точка кипения равновесного водорода	20,28	-252,87	0,004 485 17
Точка кипения неона	27,102	-246,048	0,012 212 72
Тройная точка кислорода	54,361	-218,789	0,091 972 53
Тройная точка аргона	83,798	-189,352	0,216 057 05
Точка росы кислорода	90,188	-182,962	0,243 799 12
Точка таяния льда	273,15	0	1
Точка кипения воды	373,15	100	1,392 596 68

На участке от 90,188 до 273,15 K поправочная функция имеет вид $\Delta W_4(T_{88}) = b_4(T_{88} - 273,15 \text{ K}) + e_4(T_{88} - 273,15 \text{ K})^3 (T_{88} - 373,15 \text{ K})$, (3.4)

где константы определяются из значений поправок $\Delta W = W - W_{\text{CCT-68}}$, измеренных в точке росы кислорода и в точке кипения воды*.

Диапазон от 0 °C (273,15 K) до 630,74 °C. В этом диапазоне

$$t_{88} = t'' + 0,045 \left(\frac{t''}{100^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{t''}{100^\circ\text{C}} - 1 \right) \left(\frac{t''}{419,58^\circ\text{C}} - 1 \right) \left(\frac{t''}{630,74^\circ\text{C}} - 1 \right), \quad (3.5)$$

где

$$t'' = \frac{1}{\alpha} [W(t') - 1] + \delta \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} \right) \left(\frac{t'}{100^\circ\text{C}} - 1 \right). \quad (3.6)$$

Здесь $W(t') = R(t')/R(0^\circ\text{C})$. Константы $R(0^\circ\text{C})$, α и δ определяются измерением сопротивления в тройной точке воды, точке кипения воды (или точке затвердевания олова, см. примечание 5 к табл. 3.1) и точке затвердевания цинка. Уравнение (3.6') эквивалентно уравнению

$$W(t') = 1 + At' + Bt'^2, \quad (3.6')$$

где

$$A = \alpha \left(1 + \frac{\delta}{100^\circ\text{C}} \right); \quad B = -10^{-4} \alpha \delta ^\circ\text{C}^{-2}.$$

Диапазон от 630,74 до 1064,43 °C. В этом диапазоне $E(t_{88}) = a + bt_{88} + ct_{88}^2$, где $E(t_{88})$ — электродвижущая сила эталонного платиноводород (10 % родия, 90 % платины) — платинового термоэлектрического термометра, один спай которого находится при $t = 0^\circ\text{C}$, а другой — при t_{88} . Коэффициенты a , b и c вычисляют по значениям

* Если вместо точки кипения воды в качестве реперной используется точка затвердевания олова (см. примечание 5 к табл. 3.1), то $W(100^\circ\text{C})$ для платинового термометра вычисляется по уравнениям (3.5), (3.6).

E при $t = 630,74 \pm 0,2^\circ\text{C}$, измеряемой платиновым термометром сопротивления, в точках затвердевания серебра $t_{88}(\text{Ag})$ и золота $t_{88}(\text{Au})$.

Чистота платинового эталонного термоэлектрического термометра должна быть такой, чтобы его относительное сопротивление $W(100^\circ\text{C}) \geq 1,3920$. Значения $E(630,74^\circ\text{C})$, $E[t_{88}(\text{Ag})]$ и $E[t_{88}(\text{Au})]$ должны удовлетворять следующим соотношениям:

$$E[t_{88}(\text{Au})] = 10334 \text{ мкВ} \pm 30 \text{ мкВ}; \quad (3.7)$$

$$E[t_{88}(\text{Au})] - E[t_{88}(\text{Ag})] = 1186 \text{ мкВ} + \\ + 0,17 \{E[t_{88}(\text{Au})] - 10334 \text{ мкВ}\} \pm 3 \text{ мкВ}; \quad (3.8)$$

$$E[t_{88}(\text{Au})] - E(630,74^\circ\text{C}) = 4782 \text{ мкВ} + \\ + 0,63 \{E[t_{88}(\text{Au})] - 10334 \text{ мкВ}\} \pm 5 \text{ мкВ}. \quad (3.9)$$

Диапазон выше $1064,43^\circ\text{C}$. В этом диапазоне

$$\frac{\mathcal{L}_\lambda(T_{88})}{\mathcal{L}_\lambda[T_{88}(\text{Au})]} = \frac{\exp\left[\frac{C_2}{\lambda T_{88}(\text{Au})}\right] - 1}{\exp\left[\frac{C_2}{\lambda T_{88}}\right] - 1},$$

где $\mathcal{L}_\lambda(T_{88})$ и $\mathcal{L}_\lambda[T_{88}(\text{Au})]$ — спектральные плотности энергии излучения черного тела для длины волн (в вакууме) λ при температуре T_{88} и в точке затвердевания золота $T_{88}(\text{Au})$; $C_2 = 0,014388 \text{ м} \cdot \text{К}$. Значение $T_{88}(\text{Au})$ настолько близко к термодинамической температуре затвердевания золота, а указанное значение C_2 настолько близко к истинному значению второй константы излучения уравнения Планка, что зависимость T_{88} от λ можно пренебречь.

Решением Консультативного комитета по термометрии в 1978 г. МПТШ доведена до $0,5 \text{ К}$. Установлены числовые значения следующих реперных точек:

Точка сверхпроводящего перехода свинца	7,1999 К
Точка кипения гелия ^4He	4,2221
Точка сверхпроводящего перехода индия	4,4145
Точка сверхпроводящего перехода алюминия	1,1796
Точка сверхпроводящего перехода цинка	0,851
Точка сверхпроводящего перехода кадмия	0,519

В качестве интерполяционного прибора может быть использован любой прибор, измеряющий термодинамическую температуру.

3.3. Дополнительные сведения

Эталонный термометр сопротивления. Конструкция эталонного платинового ТС должна удовлетворять определенным требованиям.

Чувствительный элемент термометра — сопротивление из платиновой проволоки с четырьмя выводами, смонтированное в свободном от напряжений состоянии и помещенное в герметически запаянную гильзу. Короткий участок каждого вывода, примыкающего к спирали, изготавливается из платины во избежание загрязнения и нагрева за счет эффекта Пельтье. Материалы, из которых изготовлены детали термометра, находящиеся вблизи чувствительного элемента, выбираются так, чтобы загрязнение платины было минимальным. Герметичная гильза термометра заполняется сухим газом, содержащим достаточное количество кислорода, с тем, чтобы создать для возможных остатков примесей в платине окислительную среду.

Чувствительный элемент отжигается при температуре более высокой, чем его расчетная максимальная (по крайней мере не ниже 450 °C), что способствует устранению дефектов кристаллической решетки и стабилизации химического состава платиновой проволоки. Во время работы термометра в платиновой проволоке могут возникнуть дополнительные дефекты, связанные с наклепом или с быстрым охлаждением от температуры 450 °C и выше. Эти дефекты устраняются дальнейшим отжигом.

При выборе конструкции и методики работы с термометром весьма важно, чтобы ошибки, связанные с электрическими утечками в изоляционных материалах, а также вызванные излучением, теплопроводностью и нагреванием измерительным током, были минимальными.

Полезным критерием, по которому можно судить о надежности термометра, является стабильность его сопротивления и относительного сопротивления при выбранной постоянной температуре. Сопротивление эталонного термометра в тройной точке воды не должно изменяться более чем на 1 мК в температурном эквиваленте (при 0 °C) при работе в течение 1 ч при $t > 200$ °C и не более чем на 0,25 мК при $t < 0$ °C.

Эталонный термоэлектрический термометр изготавливается из проволоки постоянного диаметра: от 0,35 до 0,65 мм. Электроды термометра перед его использованием тщательно отжигают. Для этой цели платиновую проволоку нагревают до температуры по крайней мере 1100 °C, а платинородиевую проволоку — до 1450 °C. Если отжиг проведен до помещения электродов в изолирующую арматуру, то после этой процедуры термометр необходимо снова нагреть до температуры по крайней мере 1100 °C и отжигать до тех пор, пока электродвижущая сила не стабилизируется и не будут устранены местные неомогенности, вызванные напряжениями. При соблюдении такой методики отжига должны выполняться указанные в уравнениях (3.8) и (3.9) пределы разброса показаний для $E[t_{68}(\text{Au})] - E[t_{68}(\text{Ag})]$ и $E[t_{68}(\text{Au})] - E[630,74 \text{ °C}]$ соответственно. Однако на практике эта методика может привести к погрешности не менее $\pm 0,2$ °C из-за постоянно изменяющихся химических и физических неомогенностей проволоки электрода в области температурных градиентов.

Давление. Давление измеряется достаточно точно либо поршневым манометром, либо по высоте ртутного столба. При этом, если t_{68} чистой ртути находится в диапазоне от 0 до 40 °C и столб ртути соответствует давлению p , которое необходимо измерить, то средняя плотность ртути определяется с достаточной точностью формулой

$$\rho(t_{68}, p/2) = \frac{\rho(20 \text{ °C}, p_0)}{[1 + A(t_{68} - 20 \text{ °C}) + B(t_{68} - 20 \text{ °C})^2] \left[1 - \kappa \left(\frac{p}{2} - p_0\right)\right]},$$

где $A = 18 \cdot 10^{-8} \text{ °C}^{-1}$; $B = 0,8 \cdot 10^{-8} \text{ °C}^{-2}$; $\kappa = 4 \cdot 10^{-11} \text{ Па}^{-1}$; $\rho(20 \text{ °C}, p_0) = 13545,87 \text{ кг/м}^3$ — плотность чистой ртути при $t_{68} = 20 \text{ °C}$ и $p_0 = 101\,325 \text{ Па}$ (1 нормальная атмосфера).

Достаточно точное значение местного ускорения свободного падения может быть получено при использовании резолюции Международного комитета мер и весов 1971 г. и Международного союза геодезии и геофизики. Гидростатическое давление, возникающее в ваннах для реализации реперных точек, оказывает небольшое, но подлежащее учету влияние на температуру (табл. 3.5).

Реализация тройной точки воды. Температура тройной точки воды реализуется в герметичных стеклянных ампулах, содержащих

только воду высокой чистоты с изотопным составом, близким к изотопному составу океанской воды. На глубине h ниже поверхности вода — пар температура равновесия между льдом и жидкой водой определяется формулой $t_{\text{вв}} = A + Bh$, где $A = 0,01^\circ\text{C}$; $B = -7 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C} \cdot \text{м}^{-1}$. Для подготовки к работе ампулы тройной точки воды вокруг осевого колодца для термометра охлаждением изнутри формируют толстый слой льда, затем достаточное количество этого слоя льда оттаивают также изнутри, вследствие чего получают новую поверхность раздела вода — лед, прилегающую к колодцу. В течение первых часов после выполнения указанных выше операций температура, измеряемая в осевом колодце для термометра, поднимается довольно быстро на несколько десятитысячных кельвина, затем в течение одного — трех дней она остается стабильной. Ампула должна быть защищена от радиации. Приготовленная таким образом и содержащаяся в ледяной ванне ампула способна сохранять температуру постоянной с отклонением не более 0,1 мК в течение нескольких месяцев. Расхождения в температурах правильно изготовленных ампул с водой из различных источников не должны превышать 0,2 мК.

Различное содержание изотопов в природной воде может вызвать заметные расхождения в значениях температуры тройной точки. Самое высокое их содержание в океанской воде: около 0,16 миллимоля дейтерия ^2H на моль водорода ^1H ; 0,4 миллимоля ^{17}O и 2 миллимоля ^{18}O на моль ^{16}O . Континентальные поверхностные воды обычно содержат около 0,15 миллимоля ^2H на моль ^1H ; вода, поступающая от полярных снегов, может иногда содержать около 0,1 миллимоля ^2H на моль ^1H .

Очистка воды слегка изменяет ее изотопный состав, а изотопный состав поверхности раздела вода — лед несколько зависит от технологии замораживания воды. Изменение изотопного состава воды, обусловленное увеличением содержания дейтерия ^2H на 10 мкмоль (при расчете на 1 моль ^1H), соответствует повышению температуры тройной точки воды на 0,04 мК. Таковым и является расхождение между температурами тройных точек океанской и обычной континентальной по-

Таблица 3.5. Влияние давления на равновесные температуры некоторых основных и вторичных реперных (постоянных) точек

Вещество	$T_{\text{вв}}, \text{K}$	Коэффициент давления	
		мК/атм	мК/м (жидкости)

Приписанное значение равновесной температуры

Равновесный			
водород	13,81*	34	0,25
Кислород	54,361*	12	1,5
Аргон	83,798*	25	3,3
Вода	273,16*	—7,5	—0,7
Олово	505,1181**	3,3	2,2
Цинк	692,73**	4,3	2,7
Серебро	1235,08**	6,0	5,4
Золото	1337,58**	6,1	10

Рекомендованное значение равновесной температуры

Неон	24,561*	16	1,9
Ртуть	234,314**	5,4	7,1
Индий	429,784**	4,9	3,3
Висмут	544,592**	—3,5	—3,4
Кадмий	594,258**	6,2	4,8
Свинец	600,652**	8,0	8,2
Сурьма	903,905**	0,85	0,5

* Тройная точка.

** Точка затвердевания при давлении 101 325 Па (1 нормальная атмосфера).

верхностной воды. Максимальное расхождение в температурах тройных точек природной воды составляет 0,25 мК.

Реализация тройной точки равновесного водорода. Водород имеет две молекулярные модификации, обозначаемые приставками «орто» и «пара». Равновесная орто- и параконцентрация зависит от температуры и при комнатной температуре соответствует примерно 75 % ортоводорода и 25 % параводорода (нормальный водород). После сжижения это соотношение медленно изменяется с течением времени; соответствующие изменения происходят и в физических свойствах водорода. В точке кипения равновесная концентрация соответствует 0,21 % орто- и 99,79 % параводорода. Температура кипения равновесного водорода ниже температуры кипения нормального водорода примерно на 0,12 К. Наименование «равновесный водород» означает, что водород имеет свою равновесную орто- и параконцентрацию при данной температуре. Чтобы избежать погрешностей при реализации реперных точек водорода, вызываемых неопределенным орто- и парасоставом, рекомендуется использовать равновесный водород, конвертированный с помощью катализатора, например, активированной гидроокиси железа, с целью сохранения постоянной равновесной концентрации водорода.

Наличие изотопов в равновесном водороде вызывает расхождение около 0,4 мК между его точкой росы (исчезающее малая доля жидкости) и точкой кипения (исчезающее малая доля пара). Нормальная концентрация изотопов водорода составляет 0,15 ммоль ^2H на 1 моль ^1H .

Температура T_{68} как функция давления паров равновесного водорода определяется с точностью до нескольких милликельвинов для диапазона от 13,81 до 23 К уравнением $\lg p/p_0 = A + B/T_{68} + CT_{68} + DT_{68}^2$, где $A = 1,711466$; $B = -44,01046$ К; $C = 0,0235909$ К $^{-1}$; $D = -0,000048017$ К $^{-2}$.

Точка кипения неона. Нормальный изотопный состав неона: 0,0027 моля ^{21}Ne и 0,092 моля ^{22}Ne на 0,905 моля ^{20}Ne . Так же, как и для водорода, расхождение между точкой росы и точкой кипения нормального неона около 0,4 мК.

Температура T_{68} как функция давления паров неона определяется с погрешностью $\pm 0,0002$ К для диапазона от 27 до 27,2 К уравнением $T_{68} = [27,102 + 3,3144 (p/p_0 - 1) - 1,24 (p/p_0 - 1)^2 + 0,74 (p/p_0 - 1)^3]$ К.

Тройная точка аргона. Наличие таких примесей, как N_2 , CO , O_2 и CH_4 , в количестве $1 \cdot 10^{-6}$ изменяет равновесную температуру на 30 мК.

Тройная точка и точка росы кислорода. Точка росы сравнительно не зависит от загрязнений кислорода летучими примесями. О наличии примесей в кислороде свидетельствует (в грубом приближении) изменение разности между точками росы и кипения. Присутствие аргона в кислороде может понизить точку росы, не изменяя заметно эту разность.

Температура T_{68} как функция давления паров кислорода определяется с погрешностью $\pm 0,1$ мК для диапазона от 90,1 до 90,3 К уравнением $T_{68} = [90,188 + 9,5648 (p/p_0 - 1) - 3,69 (p/p_0 - 1)^2 + 2,22 (p/p_0 - 1)^3]$ К.

Точка кипения воды. Температура t_{68} как функция давления паров воды определяется с погрешностью $\pm 0,1$ мК для диапазона от 99,9 до 100,1 °С уравнением $t_{68} = [100 + 28,0216 (p/p_0 - 1) - 11,642 (p/p_0 - 1)^2 + 7,1 (p/p_0 - 1)^3]$ °С. Изотопный состав должен соответствовать океанской воде. Изменение содержания дейтерия в воде вызывает изменение температуры кипения воды в том же направлении, что и для тройной точки воды, но примерно в три раза меньше.

Таблица 3.6. Вторичные реперные (постоянные) точки¹

Состояние газового равновесия ²	Международная практическая температура	
	$T_{\text{вс}}$, К	$t_{\text{вс}}$, °С
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами нормального водорода (тройная точка нормального водорода)	13,956	—259,194
Равновесие между жидкой и парообразной фазами нормального водорода (точка кипения нормального водорода)	20,397	—252,753
$\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{\text{вс}}} + CT_{\text{вс}} + DT_{\text{вс}}^2,$ <p>где $A = 1,734\,791$; $B = -44,623\,68\text{ К}$; $C = -0,023186\,9\text{ К}^{-1}$; $D = -0,000\,048\,017\text{ К}^{-2}$ для диапазона температур от 13,956 до 30 К</p>		
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами неона (тройная точка неона)	24,561	—248,589
Равновесие между жидкой и парообразной фазами неона	27,102	—246,048
$\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{\text{вс}}} + CT_{\text{вс}} + DT_{\text{вс}}^2,$ <p>где $A = 4,611\,52$; $B = -106,385\,1\text{ К}$; $C = -0,036\,833\,1\text{ К}^{-1}$; $D = 4,24892 \cdot 10^{-4}\text{ К}^{-2}$ для диапазона температур от 24,561 до 40 К</p>		
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами азота (тройная точка азота)	63,146	—210,004
Равновесие между жидкой и парообразной фазами азота (точка кипения азота)	77,344	—195,806
$\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{\text{вс}}} + C \lg \frac{T_{\text{вс}}}{T_0} + DT_{\text{вс}} + ET_{\text{вс}}^2,$ <p>где $A = 5,893\,271$; $B = -403,960\,46\text{ К}$; $C = -2,366\,8$; $D = -0,014\,281\,5\text{ К}^{-1}$; $E = 72,587\,2 \cdot 10^{-6}\text{ К}^{-2}$; $T_0 = 77,344\text{ К}$ для диапазона температур от 63,146 до 84 К</p>		
Равновесие между жидкой и парообразной фазами аргона (точка кипения аргона)	87,294	—185,856
Равновесие между жидкой и парообразной фазами кислорода	90,188	—182,962
$\lg \frac{p}{p_0} = A + \frac{B}{T_{\text{вс}}} + C \lg \frac{T_{\text{вс}}}{T_0} + DT_{\text{вс}} + ET_{\text{вс}}^2,$ <p>где $A = 5,961\,546$; $B = -467,455\,76\text{ К}$; $C = -1,664\,512$; $D = -0,013\,213\,01\text{ К}^{-1}$; $E = 50,804\,1 \cdot 10^{-6}\text{ К}^{-2}$; $T_0 = 90,188\text{ К}$ для диапазона температур от 54,361 до 94 К</p>		

Продолжение табл. 3.6

Состояние фазового равновесия ²	Международная практическая температура	
	T_{eq} , К	t_{eq} , °C
Равновесие между твердой и парообразной фазами двуокиси углерода (точка возгонки для диапазона температур от 194 до 195 К)	194,674	—78,476
Равновесие между твердой и жидкой фазами ртути (точка затвердевания ртути) ³	234,314	—38,836
Равновесие между льдом и насыщенным воздухом водой (точка таяния льда) ⁴	273,15	0
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами феноксибензола (дифенилового эфира) (тройная точка феноксибензола)	300,02	26,87
Равновесие между твердой, жидкой и парообразной фазами бензойной кислоты (тройная точка бензойной кислоты)	395,52	122,37
Равновесие между твердой и жидкой фазами индия (точка затвердевания индия) ³	429,784	156,634
Равновесие между твердой и жидкой фазами висмута (точка затвердевания висмута) ³	544,592	271,442
Равновесие между твердой и жидкой фазами кадмия (точка затвердевания кадмия) ³	594,258	321,108
Равновесие между твердой и жидкой фазами свинца (точка затвердевания свинца) ³	600,652	327,502
Равновесие между жидкой и парообразной фазами ртути (точка кипения ртути) для p от $90 \cdot 10^3$ до $104 \cdot 10^3$ Па	629,81	356,66
Равновесие между жидкой и парособразной фазами серы (точка кипения серы) для p от $90 \cdot 10^3$ до $104 \cdot 10^3$ Па	717,824	444,674
Равновесие между твердой и жидкой фазами медно-алюминиевой эвтектики	821,41	548,26
Равновесие между твердой и жидкой фазами сурьмы (точка затвердевания сурьмы) ³	903,905	630,755
Равновесие между твердой и жидкой фазами алюминия (точка затвердевания алюминия)	933,61	660,46
Равновесие между твердой и жидкой фазами меди (точка затвердевания меди)	1358,03	1084,88
Равновесие между твердой и жидкой фазами никеля (точка затвердевания никеля)	1728	1455
Равновесие между твердой и жидкой фазами кобальта (точка затвердевания кобальта)	1768	1495
Равновесие между твердой и жидкой фазами палладия (точка затвердевания палладия)	1827	1554
Равновесие между твердой и жидкой фазами платины (точка затвердевания платины)	2042	1769
Равновесие между твердой и жидкой фазами родия (точка затвердевания родия)	2236	1963

Состояние фазового равновесия ¹	Международная практическая температура	
	T_{88} , К	t_{88} , °С
Равновесие между твердой и жидкой фазами окиси алюминия (Al_2O_3) (температура плавления окиси алюминия)	2327	2054
Равновесие между твердой и жидкой фазами иридия (точка затвердевания иридия)	2720	2447
Равновесие между твердой и жидкой фазами ниобия (температура плавления ниобия)	2750	2477
Равновесие между твердой и жидкой фазами молибдена (температура плавления молибдена)	2896	2623
Равновесие между твердой и жидкой фазами вольфрама (температура плавления вольфрама)	3695	3422

¹ Приведенные значения температур являются лучшими из имеющихся к моменту составления таблицы. В настоящее время невозможно оценить погрешность этих значений температуры; погрешности могут достигать нескольких единиц последней значащей цифры. Оценки точности значений этих температур будут производиться в дальнейшем и публиковаться Международным комитетом мер и весов. ² Состояния фазовых равновесий даны при $p_0 = 101325$ Па (1 нормальная атмосфера) за исключением тройных точек и тех случаев, где давления явно указаны. ³ См. табл. 3.5 о влиянии изменения давления на эти точки затвердевания. ⁴ Точка таяния льда является очень близкой аппроксимацией к температуре, определяемой как температура на 10 мК ниже тройной точки воды.

Точки затвердевания олова и цинка. Температуры затвердевания реализуются с очень высокой воспроизводимостью путем наблюдения за горизонтальной частью кривой температура — время, характеризующей медленное затвердевание очень чистых металлов.

При определении точки затвердевания металл должен охлаждаться так, чтобы чувствительный элемент термометра имел возможно лучший тепловой контакт с поверхностью раздела твердой и жидкой фаз металла и находился с нею в тепловом равновесии. Вскоре после начала кристаллизации должна появиться или твердая оболочка, сформировавшаяся на стенках тигля, или твердая корка вокруг колодца для термометра. Температура равновесия между твердым и жидким металлом слегка изменяется в зависимости от давления (см. табл. 3.5).

Точки затвердевания серебра и золота. Температуры равновесия между жидкой и твердой фазами серебра и золота реализуются в закрытых тиглях либо из очень чистого искусственного графита, либо керамических, либо из плавленого кварца. Точка затвердевания серебра понижается из-за малых количеств кислорода, который может быть растворен в жидкой фазе. Поэтому расплавленное серебро должно находиться в атмосфере инертного газа при нормальном или пониженном давлении.

Вторичные реперные точки. Наряду с основными реперными точками МПТШ-68 (см. табл. 3.1) имеются вторичные реперные точки. Некоторые из них даны в табл. 3.6.

3.4. Практические температурные шкалы для области температур ниже 13,81 К

Для диапазона от 5,2 до, примерно, 0,2 К рекомендуется определять температуру по давлению насыщенных паров гелия. Установлены две практические шкалы: 1) «Шкала ^4He 1958 г.» (для диапазона от 5,2 до 0,5 К) и «Шкала ^3He 1962 г.» (для диапазона от 3,3 до 0,2 К). Верхние пределы шкал определяются критическими точками этих газов, а нижние — давлением паров, которое становится слишком малым для надежного измерения. Обе шкалы рекомендованы Консультативным комитетом по термометрии. Считается, что в диапазоне между 0,9 К и критической точкой ^3He расхождение значений температур T_{58} и T_{62} порядка 0,3 мК. Ниже 0,2 К определение температур осуществляется по «магнитной» шкале.

В диапазоне от 4,2 до 13,81 К в СССР измерения температур осуществляются на основе государственного специального эталона единицы температуры, созданного для группы германиевых термометров сопровитвления.

3.5. Аппаратура для воспроизведения и хранения МПТШ

▲ **Тройная точка воды.** Важнейшей аппаратурой, с помощью которой определяется размер единицы измерения температуры — кельвина, является прибор для осуществления тройной точки воды (рис. 3.1).

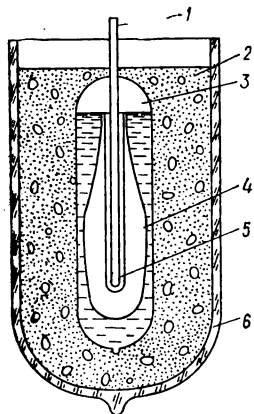


Рис. 3.1. Схема прибора для осуществления тройной точки воды:

1 — пробирка; 2 — смесь воды и колотого льда; 3 — свободное пространство; 4 — лед; 5 — вода; 6 — стеклянная колба.

Стеклянную колбу с вваренной в нее пробиркой предварительно тщательно очищают и частично заполняют дистиллированной водой. Пространство внутри колбы над поверхностью воды откачивают, а затем колбу заваривают. Для подготовки к измерениям внутри пробирки заливают жидкий воздух, в результате чего вокруг нее намерзает толстая корка льда. Далее вместо жидкого воздуха внутри пробирки наливают теплую воду и добиваются того, чтобы ледяная корка по всей длине отстала от пробирки и между ними образовалась прослойка воды. В таком состоянии колбу помещают в сосуд Дьюара со смесью колотого льда и воды. После небольшой выдержки в пространстве колбы над поверхностью воды устанавливается равновесное давление насыщенных паров, и прибор можно считать готовым к работе. Температура тройной точки воды ($+0,01^\circ\text{C}$) внутри пробирки может поддерживаться в течение многих часов.

Приборы аналогичной конструкции применяются для осуществления тройной точки кислорода ($-218,789^\circ\text{C}$) и тройной точки водорода ($-259,34^\circ\text{C}$).

Конденсационный термометр. Воспроизведение температур кипения кислорода, водорода и гелия осуществляется с помощью конденсационного термометра. Определение температуры сводится к измерению давления насыщенного пара газа и вычислению по найденному давлению

нию температуры с помощью эмпирического уравнения, выражающего зависимость от температуры давления насыщенных паров данного газа. Температурный коэффициент давления насыщенного пара достаточно велик, вследствие чего конденсационные термометры обладают высокой чувствительностью.

На рис. 3.2 дана принципиальная схема конденсационного кислородного термометра. Стеклянный сосуд емкостью около $0,5 \text{ см}^3$, заполненный при комнатной температуре чистым кислородом, соединен с ртутным манометром стеклянной трубкой, часть которой для придания ей эластичности свернута в виде спирали. Кран позволяет перегонять ртуть из манометра в баллон, который применяется для установления уровня ртути в манометре на определенную высоту. Клапан позволяет соединить колено манометра либо с маностатом для создания давления в одну атмосферу, либо с источником откачки до вакуума требуемой глубины.

При измерении температуры некоторой жидкости (теплоносителя), налитой, например, в сосуд Дьюара, сосуд погружают в эту жидкость, и в нем начинает конденсироваться жидкий кислород; а объем над его поверхностью, ограниченный с другого конца ртутью в манометре, заполнен насыщенным паром кислорода. Так как трубка и манометр находятся при комнатной температуре, то температура газообразного кислорода во всем замкнутом пространстве не будет одинаковой. Поэтому давление паров в системе принимает значение, соответствующее самой низкой температуре. Конденсация кислорода продолжается до тех пор, пока давление паров во всем замкнутом пространстве не примет значения, соответствующего температуре ванны в сосуде Дьюара как наиболее низкой.

При измерении температуры ванны кипящего кислорода наиболее низкая температура капилляра 2 будет в месте, отмеченном стрелкой, так как при испарении кислорода с поверхности можно ожидать здесь пониженную температуру по сравнению с температурой глубоких слоев. Для защиты от переохлаждения капилляр снабжен вакуумной рубашкой.

Давление насыщенных паров измеряется по разности высот столбов ртути в коленях манометра, отсчитываемой с помощью катетометра. Погрешность результатов измерения температуры жидкого кислорода с помощью конденсационного термометра около $\pm 0,001 \text{ К}$.

Точка плавления льда. Градуировка эталонных и образцовых приборов в точке 0°С с меньшей точностью и воспроизводимостью, чем в тройной точке воды, может осуществляться по точке таяния льда. Для этого используют обычно несложный прибор (рис. 3.3). На рис. 3.3, а изображен сосуд Дьюара, в нижней части которого имеется осевой канал, переходящий в резиновую трубку, перекрываемую зажимом. На рис. 3.3, б — прибор более простой конструкции, состоящий из двух коаксиально установленных цилиндрических сосудов 1 и 2. Воздушная прослойка между сосудами играет роль тепловой изоляции так же, как вакуумная рубашка в сосуде Дьюара.

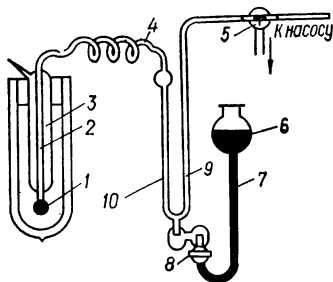


Рис. 3.2. Схема конденсационного кислородного термометра:

1 — стеклянный сосуд; 2 — прямая часть стеклянной трубки; 3 — вакуумная рубашка; 4 — трубка, согнутая в виде спирали; 5 — клапан; 6 — баллон; 7 — капилляр; 8 — кран; 9, 10 — манометр.

Во внутренний сосуд загружают мелко раздробленный, предварительно промытый пресноводный лед. Перекрыв спускную резиновую трубку в нижней части прибора, лед заливают чистой пресной водой. Через 10—15 мин в прибор можно погружать чувствительные элементы градуируемых термометров. При градуировке эталонных и образцовых термометров глубина погружения их чувствительных элементов должна быть такой, чтобы над верхним краем чувствительного элемента был слой смеси воды со льдом толщиной не менее 22 см. Чувствительный элемент не должен соприкасаться с внутренней стенкой сосуда. Слой смеси льда с водой между чувствительным элементом и стенкой должен быть не менее 10—15 мм.

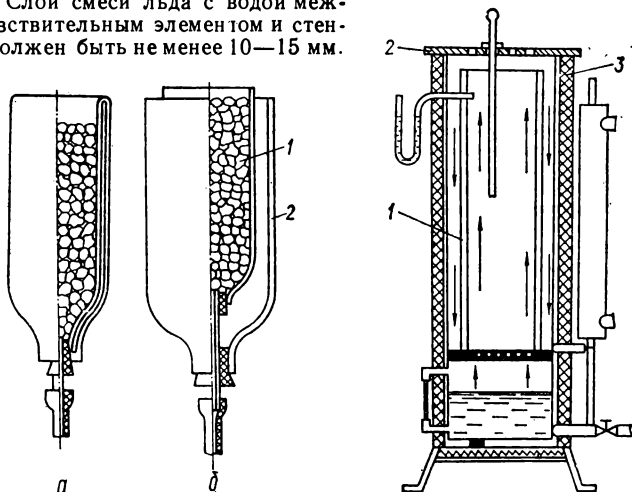


Рис. 3.3. Сосуд для осуществления точки плавления льда:
а — с осевым каналом; б — упрощенной конструкции; 1, 2 — внутренний и наружный сосуды.

Рис. 3.4. Схема кипятильника:
1 — внутренний цилиндр; 2 — крышка; 3 — наружный цилиндр.

Погрешность результатов измерения точки плавления льда около $\pm 0,005$ К.

Точка кипения воды. Градуировка эталонных и образцовых приборов в точке 100°C осуществляется при температуре кипения воды с помощью кипятильника (рис. 3.4). Градуируемые термометры устанавливают на пробковых уплотнениях в крышке. Погруженные в кипятильник чувствительные элементы термометров располагают внутри цилиндра приблизительно на середине его высоты так, чтобы они не касались его стенок. Сам цилиндр в данном случае играет роль экрана, препятствующего теплообмену излучением между чувствительными элементами градуируемых термометров и более холодными стенками наружного цилиндра.

Избыточное давление паров, измеренное U-образным водяным манометром, суммируют с атмосферным давлением в данный момент, определяемым ртутным барометром с точностью отсчета от 0,02 до 0,05 мм рт. ст. По суммарному давлению, используя соответствующую формулу, вычисляют температуру водяных паров, омывающих в кипятильнике чувствительные элементы термометров. При особо точных

работах применяют кипятильник закрытой конструкции, в котором с помощью специального маностата поддерживается с точностью до ± 5 мм рт. ст. давление паров, равное нормальному атмосферному давлению. Такая конструкция кипятильника обеспечивает температуру 100°C с погрешностью порядка $\pm 0,001$ K.

Точки затвердевания металлов. Температуры равновесия при фазовых переходах чистых металлов могут наблюдаться как при плавлении, так и затвердевании данного металла. Однако результаты градуировки термометров по температуре плавления и по температуре затвердевания одного и того же металла обычно немного различаются. Это объясняется главным образом различием условий теплообмена всего термоприемника и градуировочной печи при нагревании и охлаждении металла. Эффективная теплопроводность перемешивающейся жидкости значительно выше теплопроводности твердого вещества, а температурное поле при затвердевании более однородно, чем при плавлении. В связи с этим для получения большей точности пользуются затвердеванием металлов.

Для градуировки термометров в точке затвердевания металла наиболее удобна вертикальная трубчатая печь (рис. 3.5). Рабочее пространство печи образуется трубкой, изготовленной из фарфора или непрозрачного кварца. Внутренний диаметр трубки 50—55 мм, длина порядка 500 мм. На наружную поверхность трубки наложена нагревательная обмотка из нихромовой ленты с зазором между витками в средней части трубки 3—4 мм, а по краям — 1—2 мм. Чтобы обмотка при нагреве не сползала и не происходило замыкания ее витков, обмотку образуют массой, состоящей из смеси 48 % окиси алюминия, примерно 48 % каолина и 4 % буры. Массу разводят в воде до консистенции сметаны и, обмазав ею трубку с обмоткой, просушивают на воздухе в течение 3—4 ч. Применение жидкого стекла и асбеста, которые при высоких температурах реагируют с никромом и разрушают обмотку, недопустимо.

Для удобства демонтажа печи между трубкой и защитной фарфоровой трубкой оставляют воздушный зазор в 10—15 мм. Между защитной трубкой и наружной обшивкой засыпают теплоизоляционную смесь, состоящую из равных частей окиси алюминия, пережженного асбеста и размельченного легковесного шамота. К корпусу печи прикрепляют штатив с кремальерой, с помощью которой защитный колпачок (из фарфора или прозрачного кварца) с находящимся внутри него термометром устанавливается по оси печи и вводится в тигель с металлом. Керамические подставки, на которые устанавливают тигель, должны плотно вставляться в трубку печи для того, чтобы свести к минимуму протечку воздуха, ускоряющую сгорание тигля. Сверху тигель накрывают несколькими графитовыми крышками с осевым отверстием, в которое должен проходить защитный колпачок. Тигель для плавки чистых металлов изготавливают из чистого графита (зольность графита не должна превышать 0,3 %). Внутренний диа-

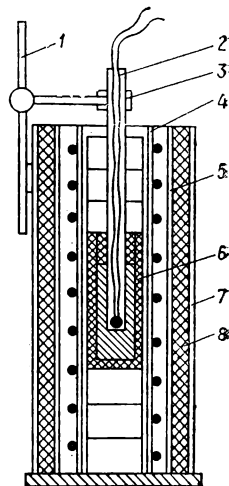


Рис. 3.5. Печь для градуировки термоприемников по температуре затвердевания металла:

1 — штатив; 2 — защитный колпачок; 3 — кремальера; 4 — трубка; 5 — защитная трубка; 6 — тигель с металлом; 7 — наружная обшивка; 8 — теплоизоляционная смесь

метр тигля порядка 30 мм, высота около 150 мм, толщина стенки и дна 7 мм. Высота навески металла в тигле не менее 120 мм. С целью устранения возможности загрязнений для плавки каждого металла используется отдельная печь.

Тигель с металлом устанавливают так, чтобы средняя его часть по высоте была расположена в средней части зоны, для которой характерна одинаковая температура. Установка тигля с металлом в зоне, где вертикальный температурный градиент печи велик, приводит к тому, что фронт затвердевания металла в тигле (при снижении температуры в печи) будет перемещаться не только в радиальном, но и в вертикальном направлении вдоль чувствительного элемента термометра. В этом случае даже при использовании металла высокой чистоты длительность «площадки» затвердевания резко сокращается. При больших градиентах температуры вдоль оси тигля площадка затвердевания вообще может быть не обнаружена. Используемые для градуировки многих образцовых приборов цинк, сурьма и медь при высоких температурах легко окисляются, соприкасаясь с кислородом воздуха. Поэтому на поверхности нагретого металла должна все время создаваться восстановительная атмосфера. Для этого перед началом нагрева печи поверхность металла в тигле покрывают засыпкой беззольного графита или угля, в которой при нагревании образуется защитный слой окиси углерода.

Наиболее опасно окисление меди, закись которой легко растворяется в жидком металле. Температура затвердевания закиси меди 1064 °С. Если концентрация ее в основном металле достигает 3,45 % (0,385 % кислорода), то при 1064 °С образуется эвтектическая смесь с хорошо выраженной площадкой затвердевания, т.е. на 20 К ниже температуры затвердевания чистой меди. При концентрации закиси меди в основном металле, меньше эвтектической, на кривой изменения температуры металла наблюдаются две площадки: одна при 1084,88 °С — температуре затвердевания чистой меди, вторая при 1064 °С — температуре затвердевания закиси меди. При концентрации закиси меди, равной 1,72 % по массе, длительность обеих площадок приблизительно одинакова. Закись меди хорошо восстанавливается. Достаточно выдержать окисленный металл при температуре, несколько превышающей 1085 °С, в течение 2 ч под защитным слоем.

Для установки градуируемого термометра через отверстия в крышках вводят в тигель защитный колпачок из прозрачного кварца или смеси 99 % Al_2O_3 + 1 % TiO_2 . Толщина стенок колпачка должна быть не больше 0,5—1,0 мм. Колпачок погружают в металл до дна тигля, а затем поднимают его на 1—2 см и закрепляют. Из-за большого удельного веса металла на колпачок действует заметная сила давления. Поэтому колпачок необходимо надежно закрепить в штативе, а погруженная в металл часть колпачка не должна касаться стенок тигля.

Печь с погруженным в жидкий металл термометром в колпачке выдерживается в течение 10—15 мин при температуре, на 10—15 К превышающей температуру затвердевания металла. Затем температуру печи снижают со скоростью 1—1,5 К/мин и периодически отсчитывают показания термометра. Через несколько минут показания термометра перестают изменяться. С этого момента их записывают через каждую минуту. По истечении примерно 10 мин процесс затвердевания металла заканчивается, и показания термометра опять начинают резко снижаться. Удовлетворительным результатом эксперимента следует считать такой, когда в течение 7—8 мин удается получить отсчеты показаний термометра, различающиеся не более чем на 0,1 К.

Модель абсолютно черного тела. Важнейшей частью государственного первичного эталона единицы температуры в области выше 1064 °С

является модель АЧТ. Свойства его излучения описываются формулой Планка, устанавливающей связь термодинамической температуры тела и интенсивности его излучения в различных участках спектра. Модели АЧТ применяются также для градуировки образцовых приборов и для сравнения показаний пирометров излучения, основанных на разных принципах действия.

Теоретически показано, что условиям, обеспечивающим строгое осуществление АЧТ, вполне удовлетворяет, например, полностью замкнутая изотермическая полость. Однако если практически и можно создать такую полость, то использовать для экспериментальных работ ее излучение вследствие полной его изолированности внутри полости не представляется возможным. Поэтому для практического использования излучения АЧТ приходится создавать модель полости с отверстием требуемой величины, а следовательно, уже не отвечающую условиям полной замкнутости. Зная геометрию полости и выходного отверстия, а также ее тепловые и оптические ха-

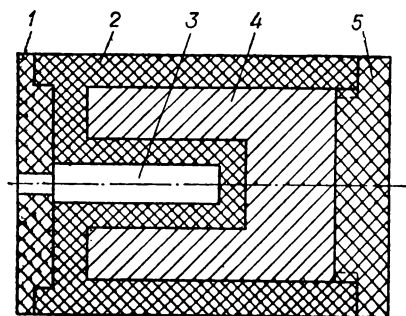


Рис. 3.6. Осевой разрез горизонтальной модели АЧТ:

1 — сменная диафрагма; 2 — графитовый корпус; 3 — излучающая полость; 4 — тигель с металлом; 5 — завинчивающаяся пробка.

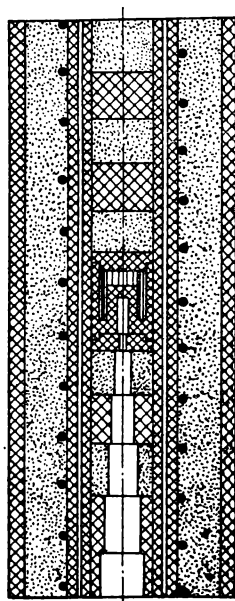


Рис. 3.7. Расположение горизонтальной модели черного тела в трубчатой печи.

актеристики, можно расчетным путем оценить и учесть искажения, вносимые выходным отверстием в параметры излучения. Но такой учет искажений является неполным, и вследствие этого всякое осуществление температурной шкалы оптическими методами приводит к некоторой зависимости ее от того, в какой степени удачно выбрана используемая модель АЧТ.

Для целей оптической пирометрии модель выбирается такой, чтобы она позволяла наблюдать излучение АЧТ при температуре затвердевания чистого золота.

Весьма высоким коэффициентом черноты излучения обладает модель черного тела следующей конструкции. Тонкостенную трубку из огнеупорного материала с закрытым концом погружают в жидкое золото на глубину, по крайней мере в 10 раз превышающую внутренний диаметр трубки. В процессе затвердевания или плавления золота соз-

дается изотермичность стенок трубки на погруженной в металл ее части, и, визируя прибор по ее оси, можно наблюдать излучение АЧТ при температуре, близкой к температуре затвердевания металла.

Неравенство температуры затвердевания золота и температуры внутренней поверхности трубки в погруженной части обусловлено тем, что из полости через отверстие трубки непрерывно выходит поток излучения. Расходуемая на излучение энергия компенсируется за счет теплового потока, непрерывно поступающего в полость от затвердевающего металла через стенки трубки. Поэтому в стенке трубки возникает перепад температур, тем больший, чем больше величина потока, излучаемого из полости, и чем больше тепловое сопротивление стенки. Этот перепад температур можно оценить расчетным путем. Поток излучения, выходящий из отверстия описанной выше модели АЧТ, направлен вверх. Это не очень удобно, и часто приходится использовать призмуполного внутреннего отражения или зеркало для изменения

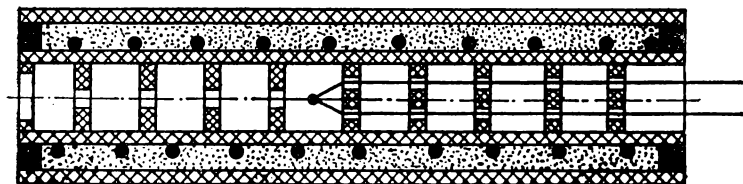


Рис. 3.8. Модель черного тела с регулируемой температурой излучающей полости.

направления лучей. Такие дополнительные оптические детали вносят дополнительные погрешности в результаты измерения лучистого потока АЧТ, вызванные неточностью определения степени ослабления лучей в этих деталях. Поэтому при некоторых экспериментах удобнее пользоваться горизонтальной моделью АЧТ для воспроизведения его яркости при температуре затвердевания какого-либо металла. Осевой разрез такой модели показан на рис. 3.6.

Для заполнения графитового тигля металлом пробку вывинчивают, тигель устанавливают в вертикальной печи излучающей полостью вниз и в него загружают кусочки металла для расплавления. После расплавления необходимого количества металла тигель охлаждают, заворачивают пробку и устанавливают в средней части горизонтальной трубчатой печи (рис. 3.7) с системой диафрагм, уменьшающих теплоотдачу излучением от сменной диафрагмы, непосредственно ограничивающей выходное отверстие излучающей полости.

В модели АЧТ с регулируемой температурой температура в излучающей полости измеряется с помощью термопары. В этом случае если излучающая полость термостатирована при высоких температурах, то при визировании ее по оси печи не удастся рассмотреть термопару на фоне перегородки (рис. 3.8). Термопара и фон, на который она проектируется, будут иметь одинаковую яркость, и поэтому их нельзя различить визуально.

3.6. Аппаратура для экстраполяции температурной шкалы

Процесс экстраполяции температурной шкалы от точки затвердевания золота осуществляется либо визуально с помощью ре-
зонансных оптических пирометров, либо, как это уже вошло в прак-

тику эталонных работ в СССР, с помощью фотоэлектрической установки.

Оптическая схема установки, использующей фотометрические методы измерения монохроматических яркостей, приведена на рис. 3.9. На оптической скамье закрепляют сравниваемые по яркости источники излучения с раздельными питанием и регулировкой. Такими источниками, например, являются модель АЧТ и температурная лампа или две температурные лампы. Изображения этих излучателей с помощью объективов создаются на входной щели призматического монохроматора. Перед щелью расположен модулятор, представляющий собой струну с наклеенной на нее призмочкой. Струна с заданной частотой совершает колебания в плоскости, параллельной плоскости входной щели, в результате чего на последней поочередно создаются изображения то одного, то другого излучателя. Струна находится между полюсами постоянного магнита, и ее колебания обуславливаются прохождением по струне переменного тока частотой около 860 Гц. Она включается в цепь обратной связи двухкаскадного усилителя и образует вместе с ним струнный генератор с самовозбуждением. Амплитуда колебания струны регулируется автоматически. Выходная щель монохроматора 5 может перемещаться по спектру в пределах длин волн от 0,45 до 1,0 мкм. Монохроматизированный в нужной длине волны луч с помощью линзы фокусируется на катоде фотоумножителя.

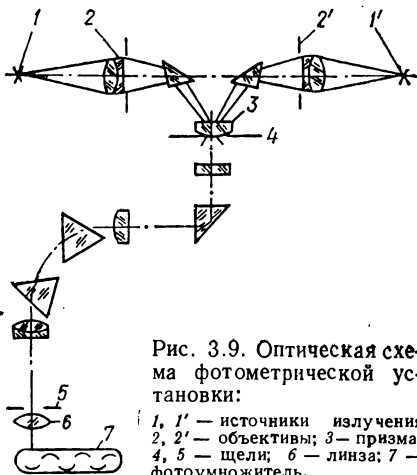


Рис. 3.9. Оптическая схема фотометрической установки:

1, 1' — источники излучения
2, 2' — объективы; 3 — щель;
4, 5 — щели; 6 — линза; 7 —
фотоумножитель.

Если яркости сравниваемых источников не равны, то в цепи фотоумножителя возникает переменная составляющая, амплитуда которой пропорциональна разности яркостей источников. Эта переменная составляющая усиливается узкополосным усилителем и выпрямляется синхронным детектором. Конечным звеном электронной схемы является усилитель постоянного тока, в анодную цепь которого включен магнитоэлектрический стрелочный прибор, фиксирующий равенство или неравенство яркостей излучателей.

С помощью описанной фотометрической установки можно градуировать температурные лампы или другие стабильные источники в разных длинах волн. Установка позволяет также осуществлять экстраполяцию температур вверх от некоторого заданного начального значения. Для этой цели применяется специальное устройство (рис. 3.10), устанавливаемое на фотометрической установке (см. рис. 3.9) между одним из излучателей и ближайшим к нему объективом. Устройство для экстраполяции состоит из плиты, на которой под углом 45° к оптической оси установлены два зеркала и две полупрозрачные стеклянные пластинки. Каждая из пластинок имеет коэффициент пропускания, равный примерно 0,5. Таким образом, луч света, идущий от излучателя, раздваивается на лучи 2—7—9 и 2—4—9 и вновь соединяется в один луч, направляющийся в объектив. Далее, открыв заслонку 5 и перекрыв заслонку 6, с помощью фотометрической установки уравни-

нивают яркость источника $1'$ (см. рис. 3.9) с яркостью источника 1 при визировании последнего по каналу 2—7—9. Затем, перекрыв заслонку 5 и открыв заслонку 6, с помощью фотоэлектрической установки уравнивают яркость источника $1'$ при визировании последнего по каналу 2—4—9. Оставляя неизменной яркость источника 1 , с помощью фотометрической установки и оптических клиньев добиваются того, чтобы излучатель 1 имел одинаковую яркость при визировании как по каналу 2—7—9, так и по каналу 2—4—9. Если такая настройка установки обеспечена, то при открывании обеих заслонок в объектив попадает пучок удвоенной интенсивности. Следовательно, рассматривая через объектив источник 1 , можно наблюдать его яркостную температуру, соответствующую удвоенной яркости по отношению

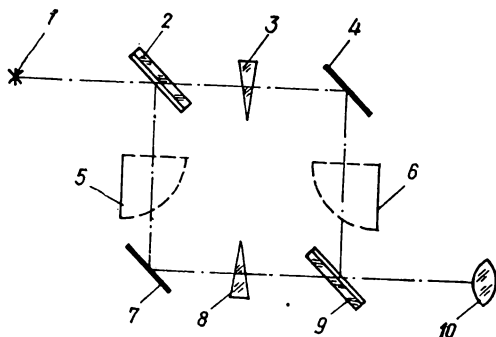


Рис. 3.10. Устройство для удвоения яркости:

1 — излучатель; 2, 9 — полупрозрачные стеклянные пластинки; 3, 8 — оптические клинья; 4, 7 — зеркала; 5, 6 — заслонки; 10 — объектив.

к первоначальной. Такой процесс удвоения яркостей можно повторять неоднократно, каждый раз получая новое, более высокое значение яркостной температуры источника 1 .

В процессе градуировки температурных ламп для исключения возможных систематических погрешностей, обусловленных несимметричностью оптических каналов фотометрической установки, излучатели (температурные лампы) приходится менять или, оставляя их на месте, перекладывать оптическую систему установки так, чтобы менялись местами ее оптические каналы. Такой порядок градуировки температурных ламп требует проведения ряда последовательных измерений с корректировкой в каждой серии установки ламп на оптической оси системы. Поэтому присущая температурным лампам некоторая неоднородность распределения яркости по ленте, а также то, что практически невозможно каждый раз вывести на оптическую ось установки строго одно и то же место на ленте лампы, приводят к возрастанию погрешности градуировки ламп. Однако применение фотометрической установки для градуировки ламп приблизительно в два раза снижает погрешности по сравнению с теми, которые получаются при использовании прецизионного визуального оптического пирометра.

Шкала цветовой температур строится с использованием соотношения между цветовой температурой T_c источника и двух его ярко-

стных температур T_1 и T_2 , измеренных в двух участках спектра с длинами волн λ_1 и λ_2 :

$$\frac{1}{T_c} = \frac{\frac{1}{\lambda_1 T_1} - \frac{1}{\lambda_2 T_2}}{\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}}.$$

3.7. Температурные лампы

В качестве эталонов, хранящих температурную шкалу выше точки золота, а также в качестве образцовых средств различных разрядов для передачи этого участка шкалы используются температурные лампы. Температурными принято называть лампы с телом накаливания из вольфрамовой ленты, градуированные, в зависимости от силы тока, протекающего через лампу, на яркостные или цветовые температуры.

Тело накала температурной лампы наиболее распространенного типа показано на рис. 3.11. Калиброванную вольфрамовую ленту шириной 2—3 мм, длиной 30—40 мм и толщиной 20—40 мкм, изогнутую в виде буквы П, приваривают концами к массивным держателям. В баллоне лампы ленту устанавливают либо вертикально, либо горизонтально, причем плоскость ее расположена перпендикулярно линии визирования. В случае надобности в стеклянный баллон лампы вваривают увиолевое или кварцевое смотровое окно. Температурные лампы выпускаются либо с вакуумированным баллоном, либо заполненным ксеноном или смесью аргона с азотом. Заполнение баллона газом резко снижает распыление вольфрамовой ленты при высоких температурах, что позволяет существенно повысить температурный предел применимости лампы. Вследствие низкой теплопроводности ксенона потери энергии на конвективную теплоотдачу в газ от накаливаемой ленты меньше, чем при заполнении другими благородными газами.

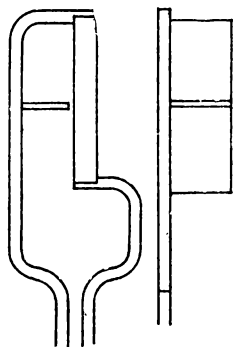


Рис. 3.11. Тело накала температурной лампы.

В результате конвективного теплообмена баллона лампы с окружающим воздухом и лучистого теплообмена накаливаемой ленты с окружающими лампу телами действительная температура ленты зависит от температуры помещения. Температурный коэффициент лампы, представляющий собой отношение приращения температуры ленты к приращению температуры окружающих тел, обратно пропорционален кубу температуры лампы. Следовательно, чем выше температура лампы, тем меньше на нее влияет температура помещения. Газонаполненные лампы обладают более высоким температурным коэффициентом, чем вакуумные. Для обеспечения высокой точности измерения силы тока, питающего лампу, применяется практически всегда питание постоянным током. Но если направление тока, протекающего через лампу, совпадает с направлением положительного градиента температуры в данной точке ленты, то вследствие эффекта Томсона происходит поглощение энергии (коэффициент Томсона σ для вольфрама отрицателен). Если же направление тока питания противоположно

направлению положительного градиента температуры, то происходит дополнительное выделение теплоты. Вдоль ленты лампы распределение температуры почти симметрично относительно середины ленты, и, следовательно, при данном направлении тока питания распределение температуры вдоль ленты искажается тем, что в одной половине ленты выделяется дополнительное количество тепла, а в другой оно поглощается.

Таким образом, вследствие действия эффекта Томсона при перемене полярности питания температурной лампы изменяется распределение температуры вдоль ее ленты. Если визировать место на ленте, находящееся в области градиента температуры, то изменение направления тока питания лампы вызовет изменение наблюдаемой яркости ленты. Очевидно, что действие эффекта Томсона обращается в нуль в области максимума температуры ленты, где градиент температуры принимает нулевое значение, но местонахождение максимума может изменяться.

В вакуумированной лампе положение области максимальной температуры на ленте определяется условиями охлаждения концов ленты вследствие теплопроводности к массивным держателям. В газонаполненной лампе характер распределения температуры по ленте несколько усложняется. На неравномерное поле температур ленты, обусловленное оттоком тепла от ее концов к держателям, накладывается влияние конвекции и теплопроводности газа, окружающего ленту.

Наложение друг на друга двух температурных полей приводит к тому, что в газонаполненной лампе с вертикальной лентой максимум температуры смещается вверх от середины приблизительно на 1—1,5 мм. Поэтому в лампах такого типа место визирования на ленте, отмеченное индексом в виде отрезка тонкой проволоки, конец которой подведен к краю ленты (см. рис. 3.11), расположено несколько выше середины ленты.

В результате неравномерности температурного поля газа в баллоне лампы при неизменном токе питания яркость места визирования на ленте изменяется в зависимости от наклона лампы. Лампу, отградуированную, например, в вертикальном положении, следует применять в таком же положении. При этом вертикальность ленты как при градуировке, так и при эксплуатации лампы целесообразно проверять отвесом. Известен случай, когда температурная лампа, отградуированная в вертикальном положении ленты, в горизонтальном изменила свою градуировку на 80 К.

После включения температурной лампы в цепь или изменения режима ее питания новое тепловое состояние лампы устанавливается только после значительного промежутка времени. В вакуумированной лампе тепловое равновесие наступает в среднем через 10 мин. В газонаполненной лампе процесс стабилизации теплового режима замедляется постепенным установлением циркуляции. Поэтому длительность установления теплового режима в газонаполненных лампах достигает 30—40 мин. Пока тепловой режим в лампе не установится, при постоянном напряжении, подаваемом к цоколю лампы, изменяется сила тока, протекающего через лампу, и яркость ее ленты.

Вольфрамовая лента температурной лампы является селективным излучателем. Коэффициент черноты излучения вольфрама, как и большинства металлов, снижается по мере возрастания длины волны. Поэтому излучение температурной лампы относительно богаче коротковолновыми лучами, чем излучение абсолютно черного тела при той же яркостной температуре. Это обстоятельство следует учитывать при использовании температурной лампы в качестве излучателя.

3.8. Система обеспечения единства измерений температуры

Обеспечение единства измерений температур в Советском Союзе возложено на государственную и ведомственные метрологические службы. Государственная метрологическая служба по всем видам измерений (включая и температуры) монопольно осуществляется органами Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР (Госстандарт СССР). В области измерений температур государственная метрологическая служба основывается на системе государственных эталонов, созданных и хранящихся в метрологических институтах Госстандарта СССР.

Во Всесоюзном научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) хранится государственный первичный эталон единицы температуры в диапазоне от 13,81 до 273,15 К. В этом же институте создан и хранится государственный специальный эталон единицы температуры в диапазоне от 4,2 до 13,81 К на основе температурной шкалы германиевого термометра сопротивления. В ВНИИМ им. Д. И. Менделеева хранятся государственные первичные эталоны единиц температуры в диапазоне от 0 до 2500 °С.

Обеспечение в стране единства измерений температур выше 2500 °С возложено на Научно-производственное объединение «Метрология» (Харьков). Это же объединение обеспечивает единство измерений в области радиационной пирометрии. Обеспечение в стране единства измерений температур методами термоэлектрической термометрии возложено на Свердловский филиал ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Для этой цели в Свердловском филиале хранятся рабочие эталоны — групповые эталоны термоэлектрических термометров переменного состава на диапазон температур от 0 до 1769 °С, получившие единицу температуры от государственного первичного эталона.

Разнообразие приборов для измерения температур, широкое их использование, в том числе в различных отраслях техники, заставило разработать систему, регламентирующую соподчиненность рабочих эталонов и образцовых средств разных разрядов, предназначенных для поверки технических средств измерений температур. Такая система, предусматривающая порядок аттестации образцовых средств и поверки технических средств измерения температуры, утверждаемая Госстандартом СССР, одновременно с утверждением соответствующего первичного эталона получила название «Поверочной схемы».

Если функциями первичного эталона являются воспроизведение, хранение и передача единицы измерения, то функциями рабочих эталонов и разрядных образцовых средств являются хранение и передача единицы измерения. Рабочие эталоны, аттестованные по соответствующему государственному первичному эталону, хранятся, как правило, в республиканских или областных центрах метрологии и стандартизации или в головном предприятии ведомственной метрологической службы, осуществляющей по нему аттестацию всех разрядных образцовых средств в соответствии с поверочной схемой. Разрядные образцовые средства хранятся и эксплуатируются в поверочных лабораториях государственной и ведомственных метрологических служб.

Рабочие эталоны и разрядные образцовые средства предназначены только для выполнения проверок нижестоящих по поверочным схемам средств измерений. Они не должны использоваться в качестве прецизионных средств измерений при выполнении, например, научных

Т а б л и ц а 3.7. Ориентировочные значения расхождений между значениями температуры по МПШ-68 и МПШ-48, К

$t_{\text{вс}}, ^\circ\text{C}$	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100
---------------------------------	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

Диапазон температур от -180 до 0°C

-100	+0,022	+0,013	+0,003	-0,006	-0,013	-0,013	-0,005	+0,007	+0,012		
- 0	0,000	+0,006	+0,012	+0,018	+0,024	+0,029	+0,032	+0,034	+0,033	+0,029	+0,022

$t_{\text{вс}}, ^\circ\text{C}$	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
---------------------------------	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Диапазон температур от 0 до 1070°C

0	0,000	-0,004	-0,007	-0,009	-0,010	-0,010	-0,010	-0,008	-0,006	-0,003	0,000
100	0,000	+0,004	+0,007	+0,012	+0,016	+0,020	+0,025	+0,029	+0,034	+0,033	+0,043
200	0,043	0,047	0,051	0,054	0,058	0,061	0,064	0,067	0,069	0,071	0,073
300	0,07	0,074	0,075	0,076	0,077	0,077	0,077	0,077	0,077	0,076	0,076
400	0,076	0,075	0,075	0,075	0,074	0,074	0,074	0,075	0,076	0,077	0,079

500	0,079	0,082	0,085	0,089	0,094	0,100	0,108	0,116	0,126	0,137	0,150
600	0,150	0,165	0,182	0,200	0,23	0,25	0,28	0,31	0,34	0,36	0,39
700	0,39	0,42	0,45	0,47	0,50	0,53	0,56	0,58	0,61	0,64	0,67
800	0,67	0,70	0,72	0,75	0,78	0,81	0,84	0,87	0,89	0,92	0,95
900	0,95	0,98	1,01	1,04	1,07	1,10	1,12	1,15	1,18	1,21	1,24
1000	1,24	1,27	1,30	1,33	1,36	1,39	1,42	1,44			

$t_{\text{ср.}}, ^\circ\text{C.}$	0	1	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
-----------------------------------	---	---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------

Диапазон температур от 1100 до 4000 °C

1000		1,5	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2
2000	3,2	3,5	3,7	4,0	4,2	4,5	4,8	5,0	5,3	5,6	5,9
3000	5,9	6,2	6,5	6,9	7,2	7,5	7,9	8,2	8,6	9,0	9,3

исследований, так как их использование может привести к нарушению стабильности показаний, а следовательно, и к нарушению правильной передачи единицы измерения. Для выполнения научных исследований должны применяться специальные средства измерений нужной точности. Аттестация образцовых средств измерений и присвоение соответствующего разряда производится органами государственной метрологической службы.

Под поверкой средств измерения температур понимается определение соответствия их метрологических характеристик (погрешность показаний или градуировочная характеристика, вариация показаний, динамические характеристики) установленным значениям в утвержденной для данных средств измерения нормативно-технической документации.

Допускаемые отклонения измеряемых значений метрологических характеристик устанавливаются по результатам испытаний нескольких образцов головной партии данного типа средств измерений, выполняемых по согласованной с органами государственной или ведомственной метрологических служб программе. Одновременно в процессе испытаний исследуется степень подверженности данного средства измерений воздействию влияющих факторов (атмосферного давления, влажности, ионизирующего излучения). Поверка средств измерений температур производится по инструкциям или методическим указаниям, утвержденным Госстандартом СССР.

Система обеспечения единства измерений непрерывно совершенствуется, о чем свидетельствует сопоставление дискретных значений одинаковых температур, декларативно установленных МПТШ в редакциях 1948 и 1968 гг. Значения расхождений между ними приведены в табл. 3.7.

В настоящее время действует МПТШ-68 в редакции 1975 г., несколько отличная от первоначальной редакции 1968 г. За время, истекшее после 1975 г., получена информация об уточнении значений температур для основных реперных точек и погрешностей в редакции МПТШ-68 1975 г. (табл. 3.8).

Таблица 3.8. Оценка погрешностей для основных реперных точек МПТШ-68 (редакция 1975 г.) по состоянию на 1980 г.

Основная реперная (постоянная) точка	Принятое значение	Оценка погрешности
Тройная точка равновесно- го водорода	13,81 К	0,01 К
Точка 17,042 К равновесно- го водорода	17,042 К	0,01 К
Точка кипения равновесно- го водорода	20,28 К	0,01 К
Точка кипения неона	27,102 К	0,01 К
Тройная точка кислорода	54,361 К	0,01 К
Точка кипения кислорода	90,188 К	0,01 К
Тройная точка воды	273,16 К	Точно по определению
Точка кипения воды	100 °С	
Точка затвердевания олова	231,9681 °С	
Точка затвердевания цинка	419,58 °С	
Точка затвердевания серебра	961,93 °С	
Точка затвердевания золота	1064,43 °С	0,2 К

ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

4.1. Классификация погрешностей средств измерения температуры

Средства измерения температуры (измерительные преобразователи, приборы, установки или информационные измерительные системы), подобно средствам измерения других физических величин, не могут обеспечить определение действительного значения температуры исследуемого объекта, поскольку физические принципы и исходные условия проведения измерений в той или иной степени оказываются нарушенными. Результат измерения температуры t_z будет отличаться от ее действительного значения t_d на величину

$$\Delta = t_z - t_d, \quad (4.1)$$

называемую абсолютной погрешностью измерения температуры. В соответствии с ГОСТ 16263—70 погрешность измерения может выражаться в долях действительного значения измеряемой величины — относительная погрешность измерения δ .

Положение МПТ Ш-68 предусматривает запись результата измерений в кельвинах и градусах Цельсия. Относительная погрешность измерения температуры с целью однозначности представляется в виде

$$\delta = \frac{T_z - T_d}{T_d} (\%), \quad (4.2)$$

где

$$T_d = t_d + T_0 = t_d + 273,15; \quad T_z = t_z + T_0 = t_z + 273,15. \quad (4.3)$$

Погрешность измерений определяется приблизительно с той или иной точностью, в зависимости от условий проведения и применяемых средств измерений, количества наблюдений и методов обработки экспериментальных данных. Погрешности измерений с целью их детального изучения и учета классифицируют по ряду признаков.

Измерение любой физической величины основано на определенном методе измерения, применяемом средстве измерения и способе фиксации результата. В зависимости от этого абсолютную погрешность измерения температуры можно разделить на три составляющие — методическую Δ_m , инструментальную $\Delta_{\text{и}}$ и погрешность регистрации наблюдения Δ_n :

$$\Delta = \Delta_m + \Delta_{\text{и}} + \Delta_n. \quad (4.4)$$

Методическая погрешность измерения температуры возникает из-за неточности выполнения принципа (метода) измерения, недостаточной изученности явлений теплообмена между исследуемым объек-

том и чувствительным элементом ИПТ и, как следствие этого, неточного знания количественных взаимосвязей исследуемой температуры и регистрируемой величины, в соответствующем масштабе отображающей результат измерения температуры.

Инструментальная, или приборная, погрешность измерения температуры возникает из-за несовершенства конкретных средств измерения температуры, использования этих средств в условиях, отличающихся от нормальных. Инструментальную погрешность средства измерения температуры разделяют на две составляющих — основную и дополнительную. Первая характеризует точностные возможности средства измерений в нормальных условиях, вторая учитывает влияние отклонений от этих условий. Для удобства и однозначности оценки погрешностей средств измерений в известных рабочих условиях проводится регламентация метрологических характеристик средств измерения. Номенклатура и определения нормируемых метрологических характеристик устанавливаются согласно ГОСТ 8.009—72.

Погрешность регистрации наблюдения (личная погрешность) определяется квалификацией и личными особенностями наблюдателя (неправильный отсчет и снятие показаний, расшифровка записей и результатов регистрации). Как правило, величина этой составляющей при исключении промахов со стороны экспериментатора незначительна по сравнению с Δ_m и Δ_{II} .

В зависимости от закономерности изменения (характера проявления) погрешность разделяют на систематическую Δ_c и случайную Δ погрешности:

$$\Delta = \Delta_c + \Delta. \quad (4.5)$$

Систематической погрешностью измерения температуры называют составляющую погрешности измерения, которая остается постоянной или закономерно изменяется в процессе измерений (либо при их повторении). Систематическую погрешность оценивают расчетным путем или экспериментально и в результат измерений вводят соответствующую поправку.

Случайной погрешностью измерения температуры называют составляющую погрешности измерения, которая заранее не предсказуема и изменяется случайным образом при повторных измерениях температуры теми же средствами измерения. Закономерности проявления случайной погрешности и ее оценка могут быть выявлены проведением многократных наблюдений температуры с последующей статистической обработкой результатов измерений (см. ГОСТ 8.207—76). В полученное значение случайной погрешности войдет и та часть систематической погрешности, которая из-за сложности и приближенности оценки Δ_c не могла быть ранее учтена при нахождении Δ . Эту неучтенную систематическую погрешность называют также неисключенным остатком систематической погрешности.

Измеряемая температура может быть стационарной (постоянной) или нестационарной, т.е. изменяться с течением времени. В зависимости от этого погрешность измерения температуры подразделяют на статическую $\Delta_{ст}$ и динамическую $\Delta_{дин}$:

$$\Delta = \Delta_{ст} + \Delta_{дин}. \quad (4.6)$$

Динамическая погрешность вызвана скоростью изменения исследуемой величины t_d (τ) и невозможностью регистрации средствами измерения

мгновенных значений нестационарной температуры из-за их теплоинерционных свойств.

Разделение погрешности измерения температуры Δ на те или иные составляющие в соответствии с выражениями (4.4), (4.5) или (4.6) проводят в зависимости от конкретных условий, требований и возможностей оценки погрешности результатов измерений.

• Согласно общим положениям информационно теории измерений и информационно-измерительной техники процесс измерения температуры, выполняемый любым средством измерения, заключается в преобразовании входной информации — температуры исследуемого объекта — на выходе измерительного устройства в величину, количественно выражающую результат измерения в удобной для дальнейшего использования форме. Совокупность преобразований исходной информации поясняется структурной схемой, каждый элемент которой может характеризовать определенный вид преобразований.

Упрощенно, без детализации промежуточных преобразований измерительной информации, структурную схему измерения температу-

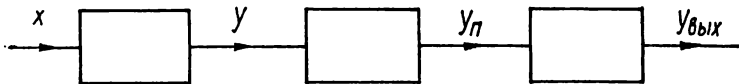


Рис. 4.1. Структурная схема средств измерения температуры.

ры можно представить в виде последовательного соединения трех элементов — звеньев структурной схемы (рис. 4.1): ИПТ, одного или нескольких ПП и измерительного (показывающего, регистрирующего на диаграмме или в цифровой форме) прибора ИПР.

Входное воздействие x (исследуемое значение температуры) преобразуется чувствительным элементом ИПТ в температуру чувствительного элемента, которая затем преобразуется в выходной сигнал ИПТ y (например, в термо-ЭДС для термопарного ИПТ или в электрическое сопротивление терморезисторного ИПТ), поступающий на ПП. В зависимости от выбора конкретного средства измерения ПП выполняют функции масштабных или функциональных преобразований, передачи и усиления по мощности измерительной информации. Воздействие y_p преобразуется ИПР в выходную величину $y_{вых}$ в форме, пригодной для анализа температурного режима исследуемого объекта. Результирующая погрешность измерения $\Delta = y_{вых} - x$ определяется вкладом каждого элемента измерительной цепи, который может иметь свои характерные значения погрешностей — методической или инструментальной, систематической или случайной. Оценка результирующей погрешности измерения температуры в общем случае является сложной задачей, требующей детального анализа всей измерительной цепи. Эта задача решается в настоящее время поэтапно с учетом специфики измерений и применяемых измерительных средств.

4.2. Источники методических погрешностей ИПТ

Контактные методы измерения температуры объектов, находящихся в твердом, жидком или газообразном состоянии, основаны на том, что чувствительный элемент измерительного преобразователя температуры должен находиться в условиях термодинамического равно-

весья с исследуемым объектом. Только в таком состоянии температура t_z чувствительного элемента равна температуре t_d объекта в исследуемой его зоне. Несоблюдение исходного принципа контактной термометрии, характерное для реальных условий измерений, приводит к возникновению методической погрешности

$$\Delta_m = t_z - t_d. \quad (4.7)$$

ИПТ, часто называемый также термоприемником или датчиком температуры, является чужеродным телом, в той или иной степени возмущающим ранее существовавшее поле температур изучаемого объекта. Учесть это возмущение в общем случае можно после изучения всего комплекса явлений теплообмена, происходивших до и после монтажа ИПТ на объекте. Определение погрешностей измерения температуры является, таким образом, частью общей проблемы исследования теплообмена системы тел, находящихся в контакте с окружающими средами или телами.

Формулировке задачи теплообмена предшествует качественный анализ, имеющий целью: а) выяснение исходного теплового состояния исследуемого объекта; б) разработку тепловой модели ИПТ в соответствии с предполагаемыми условиями его размещения в объекте; в) выявление тепловых воздействий (режимных факторов), определяющих возникновение методической погрешности, т.е. определение источников методических погрешностей.

ИПТ (его воспринимающая часть) рассматривается как некоторая система, подверженная со стороны исследуемого объекта и других окружающих объектов различным тепловым воздействиям, которые определяют процесс теплообмена и характер изменения температур внутри ИПТ и в зоне его расположения. Важнейшими из них являются следующие воздействия.

1. Тепловое воздействие исследуемого объекта — основное или полезное, информативное воздействие.
2. Теплообмен излучением между ИПТ и его окружением (для газообразных и других частично прозрачных объектов).
3. Теплопередача между отдельными элементами ИПТ (теплоотвод по ИПТ).
4. Влияние внешних нетепловых источников энергии (например, преобразование кинетической энергии потока газа в результате полного или частичного его торможения около ИПТ).
5. Влияние внутренних источников тепла (например, нагрев чувствительного элемента термометра сопротивлением измерительным током).

Все перечисленные воздействия, исключая тепловое воздействие исследуемого объекта, являются источниками возникновения нежелательных погрешностей измерения температуры. Совместное влияние этих факторов служит причиной появления неинформативного параметра входного сигнала, приводящего к отклонению температуры ИПТ от значения температуры исследуемого объекта.

Принимая меры защиты, можно уменьшить неинформативный параметр до необходимого минимума. Если это удастся сделать, то единственным фактором оказывается тепловое воздействие исследуемого объекта. И если тепловое воздействие объекта изменяется во времени, то остается лишь одна составляющая методической погрешности, обусловленная тепловой инерционностью собственно ИПТ. Часто эту составляющую называют динамической погрешностью ИПТ. Однако вклад в динамическую составляющую погрешности может внести и лю-

бой из перечисленных выше источников, если интенсивность его воздействия достаточно велика и изменяется с течением времени.

Количественный анализ методических погрешностей ИПТ в конечном итоге заключается в формулировке математической модели, определяющей процесс теплового взаимодействия объекта исследования с ИПТ. Такие модели в первом приближении классификационно могут быть сведены к следующим вариантам.

1. ИПТ оказывает относительно слабое влияние на температуру исследуемого объекта (при измерении температуры жидкостных и газовых сред), поэтому методическая погрешность определяется воздействиями основного (информативного) и помехосоздающих (неинформативных) факторов непосредственно на ИПТ. В этом случае наблюдается направленная передача тепловых воздействий.
2. ИПТ оказывает обратное воздействие на температуру исследуемого объекта, однако оно может быть непосредственно выражено через температуру объекта (например, учет тормозящего действия термодатчика, помещенного в высокоскоростной поток газа).
3. ИПТ оказывает значительное возмущающее воздействие на температуру исследуемого объекта (при измерении температуры поверхности твердых тел). Здесь требуется формулировка совместной задачи теплообмена и анализ полей температур в системе объект — ИПТ.

4.3. Математические модели и характеристики теплообмена ИПТ и исследуемых объектов

Математические модели теплообмена ИПТ с объектами исследования необходимы для оценки методических погрешностей измерения температуры и установления нормируемых метрологических характеристик ИПТ. Детализация и информативность моделей могут быть существенно различными и в значительной мере определяться требованиями к точности проводимых измерений. По степени уменьшения полноты информационных возможностей математические модели можно расположить в такой последовательности.

1. Дифференциальное уравнение теплообмена или система дифференциальных уравнений в частных производных, отражающих передачу тепла в объекте и ИПТ при учете всех существенно влияющих тепловых воздействий.

2. Обыкновенное дифференциальное уравнение или их система, получаемые редукцией (заменой) предыдущих уравнений или формулируемые независимо.

3. Решения уравнений при характерных закономерностях изменения тепловых воздействий.

4. Параметры (несколько или один из важнейших), входящие в предыдущие модели, знание структуры и численного значения которых позволяет установить тенденцию изменения или допускаемые значения методических погрешностей ИПТ.

В целях упрощения формулировки задачи и последующего ее решения уравнения теплообмена часто линеаризуют. Если эта операция выполнена, то дальнейший анализ удобно проводить, используя понятия передаточных функций ИПТ. Число таких передаточных функций соответствует числу независимых тепловых воздействий (основного и возмущающих), определяющих процесс теплообмена между ИПТ и объектом.

Взаимосвязь измеренных, зависящих в общем случае от времени t , значений $t_s(t)$ чувствительного элемента, действительных значений

t (τ) и значений других тепловых факторов f_i (τ), где $i = 1, 2, \dots, n$ (n — число факторов), выражается соотношением вида

$$T_3(s) = Y_t(s) T(s) + \sum_{i=1}^n Y_i(s) F_i(s) + F_{\text{нач}}(s), \quad (4.8)$$

где $T(s)$ и $T_3(s)$ — изображения (по Лапласу) действительной t (τ) и измеренной t_3 (τ) температур объекта*; $F_i(s)$ — изображение i -го теплового воздействия f_i (τ); $Y_t(s)$ и $Y_i(s)$ — передаточные функции ИПТ по отношению к воздействию температуры исследуемого объекта и другим тепловым воздействиям; s — параметр преобразования Лапласа. Слагаемое $F_{\text{нач}}(s)$ учитывает влияние начальных условий теплообмена (начального распределения температур в ИПТ и объек-

те); его роль с течением времени τ постепенно уменьшается и становится пренебрежимо малой.

Уравнение (4.8) получается на основе исходных дифференциальных уравнений теплообмена (см. п. 1 и 2 классификации математических моделей). Схема воздействий показана на рис. 4.2. Сигналы на входе — основное информативное воздействие температуры объекта — и помехи приложены к различным точкам ИПТ, т.е. преобразуются его разными передаточными функциями

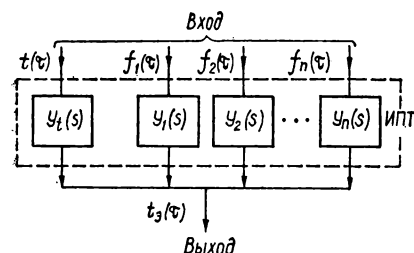


Рис. 4.2. Схема воздействий:

$t(\tau)$ — основное воздействие; $f_1(\tau)$, $f_2(\tau)$, ..., $f_n(\tau)$ — помехи.

$Y_t(s)$, $Y_i(s)$, где $i = 1, 2, \dots, n$. Сигнал на выходе ИПТ — температура чувствительного элемента t_3 (τ) — формируется как сумма всех преобразованных выходных сигналов.

Каждая из передаточных функций однозначно определяет изменение соответствующего входного сигнала в составляющую результирующего сигнала на выходе. Таким образом, достаточно полное выявление методических погрешностей достигается введением совокупности нескольких передаточных функций, отражающих влияние каждого из воздействий.

Взаимодействие ИПТ с объектом удается характеризовать с помощью одной (основной) передаточной функции $Y_t(s)$ только в том случае, если влияние помехосоздающих факторов оказывается пренебрежимо малым по сравнению с основным тепловым воздействием объекта t (τ).

Структуры передаточных функций и их параметры находятся в процессе решения исходных уравнений теплообмена. Если процессы теплообмена стационарны, то передаточные функции Y преобразуются в передаточные коэффициенты y , определяющие значения стационарных (статических) составляющих результирующего сигнала на выходе ИПТ. При нестационарном характере теплообмена каждая из со-

* Не следует смешивать изображения воздействий $T(s)$, $T_3(s)$ и им подобные с абсолютными значениями температур $t(\tau)$, $t_3(\tau)$, обозначаемыми $T(\tau)$, $T_3(\tau)$ или просто T и T_3 .

ставляющих может быть представлена в виде статической и динамической частей.

Сигналы на входе ИПТ определяются в виде детерминированных или случайных функционально задаваемых воздействий, поэтому по мере прохождения этих воздействий через элементы ИПТ в выходном его сигнале можно выделить детерминированную и случайную составляющие. Схема составляющих методической погрешности показана на рис. 4.3.

С помощью уравнения (4.8) можно получить ряд других характеристик, в явном виде определяющих реакцию ИПТ на некоторые воздействия специального вида.

1. Уравнение переходного процесса $t_{э, пер}(\tau)$, определяющее изменение температуры чувствительного элемента ИПТ при ступенчатом воздействии основного $t(\tau)$ и помехосоздающих $f_i(\tau)$ факторов.

2. Уравнение импульсной переходной характеристики $t_{э, имп}(\tau)$, когда воздействия на входе ИПТ, т. е. $t(\tau)$ и $f_i(\tau)$, задаются в виде единичной импульсной функции, или δ -функции Дирака.

3. Уравнения частотных передаточных функций $Y_t(i\omega)$ и $Y_i(i\omega)$, определяющих реакцию ИПТ на гармоническое воздействие заданной циклической частоты ω , из которых затем находят выражения амплитудной $A(\omega)$ и фазовой $\phi(\omega)$ частотных характеристик.

Функции $t_{э, пер}(\tau)$ и $t_{э, имп}(\tau)$ называют также соответственно переходной функцией и функцией веса. Наряду с введенными ранее передаточными функциями $Y_t(s)$ и $Y_i(s)$ функции $t_{э, пер}(\tau)$, $t_{э, имп}(\tau)$, $Y_t(i\omega)$ и $Y_i(i\omega)$ относятся к категории полных характеристик, определяющих динамику теплообмена ИПТ.

В стационарных условиях теплообмена из уравнения (4.8) находят статическую характеристику ИПТ:

$$t_{э, ст} = y_t t + \sum_{i=1}^n y_i f_i, \quad (4.9)$$

определяющую величину сигнала на выходе ИПТ (температуру его чувствительного элемента) в зависимости от входных стационарных воздействий t и f_i , где y_t и y_i ($i = 1, 2, \dots, n$) — передаточные коэффициенты уравнения (4.9), получаемые из передаточных функций $Y_t(s)$ и $Y_i(s)$:

$$y_t = \lim_{s \rightarrow 0} Y_t(s), \quad y_i = \lim_{s \rightarrow 0} Y_i(s). \quad (4.10)$$

С учетом (4.10) выражение для статической погрешности ИПТ согласно (4.6) можно записать в виде

$$\Delta_{ст} = t_{э} - t = (y_t - 1)t + \sum_{i=1}^n y_i f_i. \quad (4.11)$$

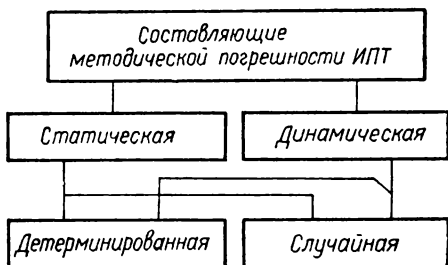


Рис. 4.3. Составляющие методической погрешности на выходе ИПТ.

При $\Delta_{\text{ст}} = 0$ статическая характеристика ИПТ (4.9) переходит в его номинальную (градуировочную) статическую характеристику.

При решении частных задач, например, для оценки длительности установления показаний при измерении стационарных температур, оценки качества переходного процесса или сравнения различных ИПТ по их тепловой инерционности можно использовать отдельные параметры передаточных функций или их комбинаторику. Для конкретных типов ИПТ или установок для измерения температуры эти характеристики (полные или частные) могут быть нормированы (см. ГОСТ 8.256-77).

Из-за большого разнообразия условий и требований к точности измерения температуры дать четкие критерии и рекомендации по выбору того или иного вида математической модели ИПТ в общем случае не представляется возможным. Относительная простота модели, т.е. простота структуры характеристик ИПТ для оценки методических погрешностей, является одним из главных требований. Вместе с тем модель должна быть достаточно информативной и отражать наиболее существенные черты взаимодействия ИПТ с объектом, т.е. должен соблюдаться разумный оптимум между строгостью задания модели ИПТ и формой представления расчетных решений.

Необходимо отметить, что уравнения теплообмена ИПТ выводятся при неизбежной схематизации процесса теплообмена и содержат ряд коэффициентов, значения которых задаются с относительно высокой погрешностью (5—20 % и более). Поэтому приемы введения расчетных поправок в результаты измерения оказываются эффективными в тех случаях, когда методические погрешности сравнительно невелики. Если оценка выявляет большие значения методических погрешностей, то уточнение таких экспериментальных данных путем введения расчетных поправок оказывается мало надежным. Требуется переход на новый тип ИПТ или использование иных методов измерения. Практическую оценку погрешностей целесообразно вести последовательно, начиная с элементарных оценок, а затем переходя к учету влияющих факторов второго и высших порядков.

4.4. Методические погрешности однородных ИПТ

Методические погрешности ИПТ наиболее подробно изучены для простых моделей термодатчиков (рис. 4.4). Предполагается, что воспринимающая часть ИПТ изготовлена из однородного материала с известными теплофизическими свойствами. Такими моделями можно условно заменить некоторые конструкции незащищенных или малогабаритных ИПТ: проволочных термометров сопротивления, термопар и термоанемометров (рис. 4.4, а), составных термодатчиков различных типов, конструктивно выполненных в виде стержней (рис. 4.4, б), плоских пластинчатых термометров сопротивления (рис. 4.4, в).

Конструктивные и физические параметры простых моделей — длина L , определяющий размер R , площадь S и периметр p поперечного сечения термодатчика; коэффициенты теплопроводности λ в продольном направлении (вдоль координаты x) и λ_s в поперечном сечении термодатчика; истинные или эффективные удельная теплоемкость c и плотность γ материала термодатчика.

Важнейшие режимные факторы, определяющие теплообмен термодатчика (рис. 4.5), — температура исследуемой среды $t(\tau)$ или $T(\tau)$; температура стенок канала, по которому проходит жидкость

(газ), или температура экрана (если таковой имеется), $t_{\text{экp}}(\tau)$ или $T_{\text{экp}}(\tau)$; температура основания термоприемника или стенки, где он закреплен, $t_{\text{осн}}(\tau)$ или $T_{\text{осн}}(\tau)$; плотность внешних потоков энергии $q(\tau)$ в расчете на единицу площади наружной поверхности термоприемника; плотность внутренних источников энергии $w(\tau)$ в расчете на единицу объема термоприемника.

Интенсивности теплообмена термоприемника характеризуются коэффициентом конвективной теплоотдачи к исследуемой среде α_k и коэффициентом теплообмена излучением α_l между термоприемником и экраном или стенкой.

Распределение температуры в продольном x и поперечном направлениях термоприемника в общем случае неравномерное. В зависимости от конструктивного оформления чувствительный элемент термоприемника регистрирует либо среднюю по сечению температуру

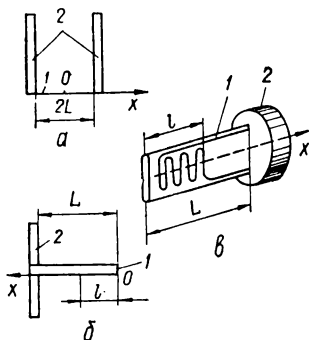
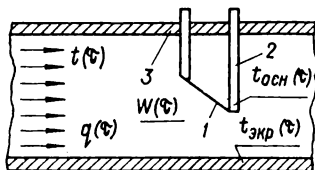


Рис. 4.4. Модели однородных ИПТ:

a — проволоочный; b — стержневой; c — пластинчатый; 1 — собственно приемник; 2 — основание ПТ (державка или стенка); l — длина, на которой расположен чувствительный элемент; L — определяющая длина ПТ; $0x$ — система координат.

Рис. 4.5. Схема тепловых воздействий:

1 — ПТ; 2 — основание (державка) ПТ; 3 — стенка канала или экран.



$t_S(x, \tau)$ для термоприемников, показанных на рис. 4.4, a, b , либо центральную температуру $t_0(x, \tau)$, если чувствительный элемент расположен по оси (см. рис. 4.4, b) или в центральной плоскости (см. рис. 4.4, c) термоприемника.

Чувствительный элемент термопар и бусинок полупроводниковых терморезисторов сосредоточен в точке $x = 0$, что соответствует температуре $t(0, \tau)$. Для металлических или полупроводниковых термометров сопротивления, а также манометрических термометров, чувствительный элемент которых расположен на некоторой длине l , происходит осреднение температуры на этом участке и измеряется средняя температура:

$$t_0(l, \tau) = \frac{1}{l} \int_0^l t_0(x, \tau) dx, \quad t_S(l, \tau) = \frac{1}{l} \int_0^l t_S(x, \tau) dx. \quad (4.12)$$

При $l \rightarrow 0$ $t_0(l, \tau) = t_0(0, \tau)$, а $t_S(l, \tau) = t_S(0, \tau)$.

В соответствии с определениями параграфа 4.3 базовой математической моделью однородных ИПТ является их дифференциальное уравнение теплообмена, связывающее воздействия температур $t(\tau)$ и $t_{\text{экp}}(\tau)$ тепловых потоков $q(\tau)$ и $w(\tau)$ со средними по поперечному с-

чению S и периметру p температурами термоприемника $t_S(x, \tau)$ и $t_p(x, \tau)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial t_S(x, \tau)}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 t_S(x, \tau)}{\partial x^2} + (m_k + m_n) t_p(x, \tau) = \\ = m_k t(\tau) + m_n t_{\text{экp}}(\tau) + \frac{1}{c\gamma} w(\tau) + \frac{p}{c\gamma S} q(\tau). \end{aligned} \quad (4.13)$$

В уравнении (4.13) a — истинный или эффективный коэффициент температуропроводности материала термоприемника:

$$m_k = \frac{\alpha_k p}{c\gamma S}, \quad m_n = \frac{\alpha_n p}{c\gamma S}. \quad (4.14)$$

Тепловой поток $q(\tau)$ от среды к термоприемнику, возникающий в результате частичного торможения газового потока термоприемником, определяется соотношением

$$q(\tau) = \alpha_k [t(\tau) + 273,15] F = \alpha_k F T(\tau), \quad (4.15)$$

где

$$F = r \frac{k-1}{2} M^2, \quad M = \frac{v}{a_{\text{зв}}}. \quad (4.16)$$

Здесь r — коэффициент восстановления термоприемника; k — отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме (показатель адиабаты); M — число Маха; v — скорость газового потока; $a_{\text{зв}}$ — скорость распространения звука в газе при температуре $T(\tau)$. Воспользовавшись взаимосвязью между $t_S(x, \tau)$ и $t_l(x, \tau)$, устанавливаемой приближенно с помощью критерия неравномерности распределения температур Ψ , а также выражением (4.15), и вводя абсолютные значения температур, взамен (4.13) получаем уравнение, содержащее только $T_S(x, \tau)$:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_S(x, \tau)}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 T_S(x, \tau)}{\partial x^2} + (m_k + m_n) \Psi T_S(x, \tau) = \\ = m_k \Psi (1 + F) T(\tau) + m_n \Psi T_{\text{экp}}(\tau) + \frac{1}{c\gamma} w(\tau). \end{aligned} \quad (4.17)$$

Критерий Ψ в диапазоне его значений $0,6 < \Psi \leq 1$ рассчитывается по формуле

$$\Psi = \left[1 + \frac{(\alpha_k + \alpha_n) R}{(3+n) \lambda_S} \right]^{-1}, \quad (4.18)$$

в которой для термоприемников цилиндрической формы $n = 1$, а определяющий размер R совпадает с их радиусом. Для пластинчатых термоприемников R равен их полутолщине, а $n = 0$.

Граничными условиями для уравнения (4.17) являются задание температуры $t_{\text{осн}}(\tau)$ основания термоприемника в месте его контакта со стенками канала или резервуара и отсутствие градиента температуры при $x = 0$:

$$t_S(x, \tau) \Big|_{x=L} = t_{\text{осн}}(\tau), \quad \frac{\partial t_S(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0. \quad (4.19)$$

Применяя к уравнению (4.17) преобразование Лапласа и решая его с учетом (4.19), получаем уравнение вида (4.8), устанавливающее вза-

являясь искомой температурой с воздействиями для моментов времени t , далеких от начального:

$$T_S(l, s) = Y_t T(s) + Y_{\text{осн}} T_{\text{осн}}(s) + Y_{\text{экp}} T_{\text{экp}}(s) + Y_w W(s). \quad (4.20)$$

Здесь $T_S(l, s)$ — изображение средней на участке l температуры $T_S(l, t)$ (см. определение (4.12)); s — параметр преобразования Лапласа; $T(s)$, $T_{\text{осн}}(s)$ и $T_{\text{экp}}(s)$ — изображения абсолютных температур $T(t)$, $T_{\text{осн}}(t)$ и $T_{\text{экp}}(t)$; Y_t , $Y_{\text{осн}}$, $Y_{\text{экp}}$ и Y_w — передаточные функции односродного термоприемника соответственно по отношению к воздействиям $T(t)$, $T_{\text{осн}}(t)$, $T_{\text{экp}}(t)$ и $w(t)$; $W(s)$ — изображение источника тепла $w(t)$.

Структура передаточных функций следующая:

$$Y_t = m_k (1 + F) \Psi \Phi; \quad (4.21)$$

$$Y_{\text{экp}} = m_l \Psi \Phi; \quad Y_{\text{осн}} = \frac{\text{sh } \beta \rho_l}{\beta \rho_l} \frac{1}{\text{ch } \beta}; \quad Y_w = \frac{1}{c\gamma} \Phi, \quad (4.22)$$

$$\Phi = \frac{1}{s + (m_k + m_l) \Psi} \left(1 - \frac{\text{sh } \beta \rho_l}{\beta \rho_l} \frac{1}{\text{ch } \beta} \right); \quad (4.23)$$

где

$$\beta = \sqrt{\frac{s + (m_k + m_l) \Psi}{a}} L; \quad \rho_l = \frac{l}{L}. \quad (4.24)$$

Функция (4.21) определяет передачу и преобразование основного (полезного, информативного) сигнала — температуры среды $t(t)$, а функции (4.22) — передачу помехосоздающих (неинформативных) воздействий — температур $t_{\text{осн}}(t)$, $t_{\text{экp}}(t)$ и источника тепла $w(t)$.

В стационарном режиме теплообмена все воздействия во времени постоянны, и из уравнения (4.20) путем предельного перехода можно определить статическую характеристику однородного ИПТ в форме уравнения (4.9), а затем найти выражение для статической методической погрешности ИПТ. В соответствии с выражением (4.11) статическую погрешность измерения температуры текущей среды (жидкости, газа) $\Delta t(t)_{\text{ст}} = t_S(l) - t = T_S(l) - T$ можно выразить в виде суммы составляющих от каждого из четырех воздействий:

$$\Delta t(l)_{\text{ст}} = \Delta t + \Delta_{\text{осн}} + \Delta_{\text{экp}} + \Delta_w, \quad (4.25)$$

где

$$\Delta t = -[1 - m_k (1 + F) \Psi \Phi_{\text{ст}}] T = -\left[1 - (1 + F) (1 - \eta) \frac{\alpha_k}{\alpha_k + \alpha_l} \right] T; \quad (4.26)$$

$$\Delta_{\text{осн}} = \eta T_{\text{осн}}; \quad \Delta_{\text{экp}} = m_l \Psi \Phi_{\text{ст}} T_{\text{экp}} = \frac{(1 - \eta) \alpha_l}{\alpha_k + \alpha_l} T_{\text{экp}}; \quad (4.27)$$

$$\Delta_w = \frac{1}{c\gamma} \Phi_{\text{ст}} w = \frac{(1 - \eta) S}{(\alpha_k + \alpha_l) \rho \Psi} w; \quad (4.28)$$

$$\left. \begin{aligned} \eta &= \frac{\text{sh } \mu \rho_l}{\mu \rho_l} \frac{1}{\text{ch } \mu}; \quad \Phi_{\text{ст}} = \frac{1 - \eta}{(m_k + m_l) \Psi}; \\ \mu &= \sqrt{\frac{(m_k + m_l) \Psi}{a}} L = \sqrt{\frac{(\alpha_k + \alpha_l) \Psi \rho}{\lambda S}} L \end{aligned} \right\}. \quad (4.29)$$

Расчет методической погрешности при нестационарных режимах теплообмена базируется на решениях уравнения (4.20). Упрощенные соотношения между измеренной температурой и воздействиями находят заменой точных уравнений передаточных функций (4.21), (4.22) их приближенными выражениями. Так, при относительно медленных изменениях $T_{\text{экр}}(\tau)$, $T_{\text{осн}}(\tau)$, $\omega(\tau)$ и при выполнении условия $\mu > 3$ комплекс φ , определяемый выражением (4.23), можно заменить соотношением

$$\varphi = \frac{1 - \eta}{(m_k + m_l)\Psi} \frac{1}{1 + \varepsilon s} = \varphi_{\text{ст}} \frac{1}{1 + \varepsilon s}, \quad (4.30)$$

где

$$\varepsilon = \frac{1}{(m_k + m_l)\Psi} \left[1 - \frac{1}{2} \frac{\eta}{1 - \eta} f(\mu) \right], \quad (4.31)$$

$$f(\mu) = \mu \operatorname{th} \mu + 1 - \frac{\mu \rho_l}{\operatorname{th} \mu \rho_l}, \quad (4.32)$$

а остальные параметры определяют в соответствии с (4.14), (4.18), (4.24), (4.29).

Подстановка соотношения (4.30) в (4.21), (4.22) и обратный переход от (4.20) к оригиналам устанавливают вид приближенного дифференциального уравнения связи между измеренным значением температуры и воздействиями:

$$\begin{aligned} \varepsilon \frac{dT_S(l, \tau)}{d\tau} + T_S(l, \tau) &= m_k \Psi (1 + F) \varphi_{\text{ст}} T(\tau) + \\ &+ m_l \Psi \varphi_{\text{ст}} T_{\text{экр}}(\tau) + \varphi_{\text{ст}} \frac{1}{c\gamma} \omega(\tau) + \eta T_{\text{осн}}(\tau), \end{aligned} \quad (4.33)$$

с помощью которого суммарная методическая погрешность измерения нестационарной температуры газа (или жидкости) $\Delta t(l, \tau) = t_S(l, \tau) - t(\tau) = T_S(l, \tau) - T(\tau)$ запишется в виде

$$\Delta t(l, \tau) = \Delta_t(\tau) + \Delta_{\text{осн}}(\tau) + \Delta_{\text{экр}}(\tau) + \Delta_{\omega}(\tau) + \Delta_{\text{дин}}(\tau). \quad (4.34)$$

В уравнении (4.34) составляющие погрешности $\Delta_t(\tau)$, $\Delta_{\text{осн}}(\tau)$, $\Delta_{\text{экр}}(\tau)$, $\Delta_{\omega}(\tau)$ рассчитываются по стационарным формулам (4.26)–(4.28), однако с учетом изменения со временем воздействий $T(\tau)$, $T_{\text{осн}}(\tau)$, $T_{\text{экр}}(\tau)$ и $\omega(\tau)$, т. е. являются квазистационарными составляющими суммарной погрешности $\Delta t(l, \tau)$.

Составляющая

$$\Delta_{\text{дин}}(\tau) = -\varepsilon \frac{dT_S(l, \tau)}{d\tau} = -\varepsilon \frac{dt_S(l, \tau)}{d\tau}, \quad (4.35)$$

часто называемая динамической погрешностью, характеризует влияние теплоинерционных свойств ИПТ. Из выражения (4.35) следует, что значение динамической погрешности ИПТ пропорционально скорости изменения его показаний во времени. Коэффициент пропорциональности ε , структура которого для однородных термодатчиков определяется формулами (4.31), (4.32), (4.29), (4.14), принято называть показателем термической инерции измерителя температуры. Из определения (4.35) следует, что в стационарных или квазистационарных режимах теплообмена ИПТ $\Delta_{\text{дин}} = 0$.

В зависимости от соотношений между параметрами ИПТ и требований к оценке точности результата измерений структура составляющих уравнения (4.34) может видоизменяться.

4.5. Оценка влияния различных факторов на точность измерения температуры

Уравнения (4.25) и (4.34), определяющие методическую погрешность однородных термоприемников, удобно использовать для получения предельных оценок, минимизирующих различные ее составляющие. Из всего комплекса параметров, одновременно действующих в реальных условиях, можно выделить несколько наиболее характерных, изменением которых удается снижать погрешность измерения температуры. Рассмотрим последовательно влияние этих факторов.

Неравномерность распределения температуры по поперечному сечению термоприемника. Для однородных термоприемников степень неравномерности распределения температуры по сечению S термоприемника учитывается критерием Ψ , оцениваемым по формуле (4.18).

Для цилиндрических и пластинчатых термоприемников неравномерность температуры по сечению S не превышает 1 % ($\Psi \geq 0,99$), если соответственно выполняются условия

$$\frac{(\alpha_k + \alpha_n) R}{\lambda_s} \leq 0,04 \text{ и } \frac{(\alpha_k + \alpha_n) R}{\lambda_s} \leq 0,03. \quad (4.36)$$

При выполнении неравенств (4.36) в приведенных выше расчетных зависимостях с погрешностью не более 1 % можно полагать $\Psi = 1$. Для составных термоприемников, когда чувствительный элемент отделен от исследуемой среды защитной оболочкой, требуются иные оценки, и соотношения (4.36) можно использовать как ориентировочные.

Газодинамический нагрев термоприемника. Нагрев термоприемника в результате торможения им высокоскоростного потока газа учитывается критерием F , определяемым формулами (4.16). Для двухатомных газов показатель адиабаты $k = 1,4$, и для всех термоприемников с коэффициентами восстановления $r \approx 0,5 \div 0,99$ $F < 0,01$ при $M < 0,2$.

При измерении температуры высокоскоростных потоков газа, если $\Delta_{осн}$, $\Delta_{экр}$, Δ_w пренебрежимо малы, из уравнения (4.25) находится оценочная формула для составляющей систематической погрешности Δ_t , обусловленной только преобразованием кинетической энергии газового потока в теплоту:

$$\Delta_t = t_s - t = FT = r \frac{k-1}{2} M^2 T, \quad (4.37)$$

где t_s — температура чувствительного элемента ИПТ; t — температура газового потока. Из (4.37) следует, что превышение температуры чувствительного элемента зависит от скорости набегающего потока, коэффициента восстановления, состава газа и термодинамической температуры потока. При скорости движения газа менее 60 м/с $\Delta_t < 2\text{К}$.

Измерение температуры высокоскоростных потоков газа имеет свою специфику. Термоприемник, помещенный в такой поток, как следует из (4.37), принципиально не может измерить термодинамическую (действительную) температуру потока. Поэтому стремятся разработать такие конструкции измерителей температуры, значения коэффициентов восстановления которых при стационарном течении газа

слабо зависели бы от температуры потока, его скорости и числа Маха M .

Расчет конструкций ИПТ, определение их коэффициентов восстановления и практические приемы использования ИПТ при контроле высокоскоростных потоков газа составляют предмет специальных исследований.

Теплопередача (теплоотвод) вдоль термоприемника. Составляющая $\Delta_{\text{осн}}$ погрешности теплоотвода в уравнениях (4.25) и (4.34) определяется первым из уравнений (4.27), из которого находится следующая предельная оценка:

$$\frac{\Delta_{\text{осн}}}{T_{\text{осн}}} < 0,01 \text{ при } \eta = \frac{\text{sh } \mu \rho_l}{\mu \rho_l} \frac{1}{\text{ch } \mu} < 0,01. \quad (4.38)$$

При малых скоростях движения газа (когда $F = 0$), отсутствии внутреннего нагрева ($w = 0$) и $T = T_{\text{экр}}$ из уравнения (4.25) получается широко используемая формула

$$\Delta t(l)_{\text{ст}} = t_S(l) - t = \eta (T_{\text{осн}} - T) = \eta (t_{\text{осн}} - t), \quad (4.39)$$

из которой с учетом (4.29) и (4.24) следует, что $\frac{\Delta t(l)_{\text{ст}}}{t_{\text{осн}} - t} = \eta < 0,01$, если $\mu > 5,3$ (для термопар при $\rho_l = 0$) и $\mu > 7$ (для термометров сопротивления при $\rho_l = 0,5$).

Практически для уменьшения η увеличивают длину погруженной части термоприемника, уменьшают его поперечное сечение, выбирают материалы защитной оболочки с низким коэффициентом теплопроводности и интенсифицируют теплообмен между термоприемником и газом, т.е. увеличивают коэффициент теплоотдачи α_k . Погрешность из-за теплоотвода уменьшается по мере приближения температуры основания к температуре газа. Для выполнения этого условия иногда принудительно подогревают (или охлаждают) основание термоприемника.

Теплообмен излучением со стенками канала или экрана. Составляющая погрешности $\Delta_{\text{экр}}$ возникает при измерении температуры газов и вызвана теплообменом излучением между термоприемником и окружающими его телами и средами. При отсутствии теплоотвода ($\eta = 0$), газодинамического и внутреннего нагрева ($F = 0$, $w = 0$) уравнение (4.25) переходит в следующее:

$$\Delta t(l)_{\text{ст}} = t_3 - t = \frac{\alpha_l}{\alpha_k + \alpha_l} (t_{\text{экр}} - t) = \frac{\alpha_l}{\alpha_k} (t_{\text{экр}} - t_3), \quad (4.40)$$

где $t_3 = t_S(l)$. Требование малости ошибки сводится к выполнению условий

$$\frac{\alpha_l}{\alpha_k} \rightarrow 0, \quad t_{\text{экр}} \rightarrow t, \quad (4.41)$$

т.е. к интенсификации конвективного теплообмена (увеличению α_k ; применению защитных материалов, наружная поверхность которых имеет малую излучательную способность, или к созданию системы экранов, затрудняющих теплообмен излучением).

Нагрев термоприемника измерительным током. Составляющая методической погрешности возникает в термометрах сопротивления

(металлических и полупроводниковых) в условиях недостаточно интенсивного теплообмена, когда измерительный ток вызывает недопустимый перегрев их чувствительного элемента.

Вклад внутренних источников тепла w в погрешность измерения температуры определяется формулой (4.28). В частном случае при отсутствии газодинамического нагрева ($F = 0$), теплоотвода ($\eta = 0$) и при $T = T_{\text{экp}}$ уравнение (4.25) преобразуется в формулу для оценки погрешности из-за подогрева термоприемника измерительным током:

$$\Delta t = t_S - t = \frac{S}{(\alpha_k + \alpha_n) p \Psi} w = \frac{S w}{(\alpha_k + \alpha_n) p} \left[1 + \frac{(\alpha_k + \alpha_n) R}{(3 + n) \lambda_S} \right], \quad (4.42)$$

где t_S — средняя температура термоприемника по его поперечному сечению S ; t — истинная температура среды; w — мощность внутренних тепловыделений в расчете на единицу объема термоприемника, Вт/м³. Если чувствительный элемент располагается в центре по оси или в центральной плоскости измерителя, то вместо (4.42) может использоваться приближенная формула

$$\Delta t = t_S - t = \left[\frac{S}{(\alpha_k + \alpha_n) p \Psi} + \frac{R^2}{2(3 + n) \lambda_S} \right] w, \quad (4.43)$$

где расчет Ψ и выбор R и n ведется с учетом (4.18). Для составных (неоднородных) термоприемников расчетные формулы (4.42) и (4.43) требуют модификации с учетом конструктивных особенностей ИПТ.

Для технических металлических термометров сопротивления измерительный ток не превышает $J_{\text{макс}} = 3 \div 20$ мА. Для полупроводниковых термометров сопротивления

$$J_{\text{макс}} \leq \sqrt{\frac{K_{\text{полн}} \Delta t}{R_t}}, \quad (4.44)$$

где $K_{\text{полн}}$ — полный коэффициент теплопередачи (коэффициент рассеяния) от полупроводникового терморезистора к окружающей среде, Вт/К; R_t — его электрическое сопротивление при температуре среды t , Ом; Δt — заданная погрешность из-за перегрева.

Величины, входящие в формулы (4.42) — (4.44), трудно поддаются определению. Поэтому в точных измерениях можно определить поправку экспериментально измерением некоторой заранее неизвестной, но постоянной температуры при двух значениях измерительного тока i_1 и i_2 и регистрации изменения температуры чувствительного элемента (Δt_1 — Δt_2). По результатам таких измерений поправка на нагрев термометра измерительным током определяется формулой

$$\Delta t = t_S - t = (t_{s1} - t_{s2}) \frac{i_2^2}{i_1^2 - i_2^2}.$$

Тепловая инерционность термоприемника. Составляющая погрешности $\Delta_{\text{дин}}$ (см. уравнения (4.34) и (4.35)) возникает вследствие того, что термоприемник не успевает мгновенно следить за изменением температуры окружающей среды. Такое явление запаздывания показаний принято называть тепловой инерцией ИПТ. В случае, когда нет неравномерности температуры по сечению ИПТ ($\Psi = 1$), теплоотвода ($\eta = 0$), газодинамического нагрева ($F = 0$), излучения ($m_{\text{л}} = 0$) уравнение (4.33) преобразуется к уравнению элементарной теории

тепловой инерции, связывающему температуры среды t (τ) и чувствительного элемента ИПТ t_s (τ) простой зависимостью:

$$\Delta_{\text{дин}}(\tau) = t_s(\tau) - t(\tau) = -\frac{1}{m_k} \frac{dt_s(\tau)}{d\tau}. \quad (4.45)$$

При указанных ограничениях погрешность измерения нестационарной температуры определяется единственным параметром — показателем тепловой инерции (постоянной времени) термоприемника (см. формулу (4.14)):

$$\varepsilon_k = \frac{1}{m_k} = \frac{c\gamma S}{\alpha_k \rho}. \quad (4.46)$$

В общем случае (см. формулу (4.31)) показатель тепловой инерции ε учитывает вклад в динамику теплообмена таких факторов, как лучистый теплообмен с экраном, теплоотвод вдоль термоприемника и неравномерность температуры Ψ в поперечном сечении. Зная ε и скорость изменения температуры $\frac{dT_S(l, \tau)}{d\tau}$, можно по определению (4.35) оце-

нить влияние тепловой инерции на точность измерения нестационарных температур.

Показатель тепловой инерции ИПТ относится по терминологии ГОСТ 8.256—77 к частным динамическим характеристикам ИПТ. Параметр ε пригоден для сравнительной оценки тепловой инерционности ИПТ в разных условиях теплообмена или сравнения нескольких термоприемников в одном и том же режиме их работы. Зависимость показателя тепловой инерции от внешних условий теплообмена $\varepsilon = \varepsilon(\alpha_k)$ или $\varepsilon = \varepsilon(\alpha)$, где $\alpha = \alpha_k + \alpha_d$, называют характеристической кривой тепловой инерции (см. формулу (4.46)). В предельных условиях теплообмена при $\alpha \rightarrow \infty$ $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_{\text{мин}}$. Это минимально возможное значение показателя тепловой инерции часто используется в качестве предельной сравнительной меры тепловой инерционности.

4.6. Динамические характеристики ИПТ

Динамические характеристики ИПТ устанавливают взаимосвязь между величинами выходного и входных нестационарных воздействий, приложенных к ИПТ (см. рис. 4.2). Линеаризация уравнений, описывающих процессы преобразования входных сигналов в ИПТ, или исходная предпосылка о возможности представления ИПТ как линейного преобразующего устройства позволяют анализировать взаимосвязи воздействий с помощью передаточных функций (см. уравнение (4.8)). Число и структура передаточных функций зависят от типа принимаемого ИПТ и детальности описания процесса его теплообмена.

Динамика теплообмена однородных (а также некоторых составных) термоприемников достаточно полно определяется четырьмя передаточными функциями (см. уравнение (4.20)). Для составных (многоэлементных) термоприемников число передаточных функций может быть большим.

В практике температурных измерений принимают меры, чтобы влияние возмущающих воздействий $f_i(\tau)$ (излучение, теплоотвод, внутренний нагрев) свести к минимуму, а значение составляющих выходного сигнала от этих воздействий стабилизировать, т.е. сделать независимым или слабозависимым от времени. При этих условиях

и для моментов времени, далеких от начального, т.е. при $\tau \rightarrow \infty$, результирующее влияние источников помех может учитываться в виде квазистационарного слагаемого всех систематических составляющих:

$$T_{\text{вл}}(s) = \sum_{i=1}^n Y_i(s) F_i(s), \quad t_{\text{вл}}(\tau) \cong \sum_{i=1}^n y_i f_i(\tau). \quad (4.47)$$

Используя (4.47), получаем два эквивалентных соотношения:

$$\left. \begin{aligned} t_3(\tau) &= t_{\text{вл}}(\tau) + L^{-1} \{Y_i(s) T(s)\} \text{ при } \tau \rightarrow \infty \\ T_3(s) - T_{\text{вл}}(s) &= Y_i(s) T(s) \end{aligned} \right\}, \quad (4.48)$$

в которых главной динамической характеристикой является передаточная функция $Y_i(s)$, устанавливающая взаимосвязь измеренной $t_3(\tau)$ и действительной $t(\tau)$ температур (L^{-1} — символ операции обратного преобразования Лапласа).

Функция $t_{\text{вл}}(\tau)$ может рассматриваться как известная составляющая сигнала на выходе, обусловленная совместным влиянием неинформативных входных сигналов. Значение $t_{\text{вл}}(\tau)$ определяется по заданным или предполагаемым значениям $f_i(\tau)$ и передаточным коэффициентам y_i , которые находятся из предельного перехода (4.10) по ранее найденным передаточным функциям $Y_i(s)$.

Структура передаточной функции $Y_i(s)$ в конечном итоге определяет остальные важнейшие динамические характеристики ИПТ: переходную и частотные характеристики и другие виды реакций ИПТ на воздействие входного сигнала $t(\tau)$. Переходная характеристика (передаточная функция) ИПТ определяет изменение его температуры $t_3(\tau)$ при скачкообразном изменении входных сигналов. Для однородных термоприемников в первом приближении

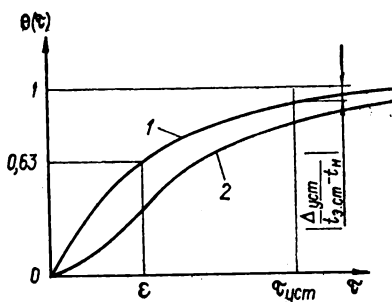


Рис. 4.6. Переходная характеристика однородного ИПТ:

1 — первое приближение, уравнение (4.50);
2 — второе приближение, уравнение (4.63).

$$Y_i(s) = \frac{y_i}{1 + \varepsilon s}, \quad y_i = m_k \Psi (1 + F) \Phi_{\text{ст}}, \quad (4.49)$$

а процесс теплообмена ИПТ описывается уравнением (4.33). Пусть в момент времени $\tau = 0$ воздействия $t(\tau)$, $t_{\text{кр}}(\tau)$, $t_{\text{осн}}(\tau)$, $\omega(\tau)$ мгновенно (скачкообразно) изменились от нулевых до некоторых постоянных значений t , $t_{\text{кр}}$, $t_{\text{осн}}$, ω . Тогда, принимая начальное значение температуры ИПТ $t_S(l, 0) = t_n$ и решая уравнение (4.33), получаем (см. рис. 4.6)

$$\Theta(\tau) = \frac{t_{3,\text{пер}}(\tau) - t_n}{t_{3,\text{ст}} - t_n} = \frac{T_{3,\text{пер}}(\tau) - T_n}{T_{3,\text{ст}} - T_n} = 1 - e^{-\tau/\varepsilon}, \quad (4.50)$$

где $t_{3,\text{пер}}(\tau) = t_S(l, \tau)$ — температура чувствительного элемента ИПТ в переходном процессе.

Уравнение (4.50) определяет переходную характеристику однофодного ИПТ в первом приближении. Согласно уравнениям (4.9) и (4.33)

$$T_{э.ст} = Y_t T + Y_{осн} T_{осн} + Y_{экр} T_{экр} + Y_w w, \quad (4.51)$$

где $T_{э.ст} = t_{э.ст} + 273,15$ — установившаяся (стационарная) температура термоприемника Y_t находится по формулам (4.49);

$$Y_{экр} = m_L \Psi \Phi_{ст}; \quad Y_w = \frac{1}{c\gamma} \Phi_{ст}; \quad Y_{осн} = \eta. \quad (4.52)$$

В частном случае, когда источники помех отсутствуют, из (4.51) следует $T_{э.ст} = T$, т. е. $t_{э.ст} = t$, и уравнение (4.50) переходит в известное уравнение, определяющее разогрев (охлаждение) термоприемника в среде с постоянной температурой t .

На основе уравнения (4.50) можно определить длительность времени установления показаний $\tau_{уст}$ (время выдержки, время недохода), по истечении которого разность между установившейся $t_{э.ст}$ и текущей $t_{э.пер}(\tau)$ температурами термоприемника равна наперед заданной величине $\Delta_{уст} = t_{э.пер}(\tau_{уст}) - t_{э.ст}$:

$$\tau_{уст} = \varepsilon \ln \frac{t_{э.ст} - t_n}{t_{э.ст} - t_{э.пер}(\tau_{уст})} = \varepsilon \ln \left| \frac{t_{э.ст} - t_n}{\Delta_{уст}} \right|. \quad (4.53)$$

При $\tau_{уст} = 3\varepsilon \Delta_{уст}$ составляет 5% ($t_n - t_{э.ст}$), а при $\tau_{уст} = 5\varepsilon$ недоход составляет 0,7%.

Реакцию ИПТ на гармонические воздействия входных сигналов определяют с помощью частотных характеристик ИПТ. Амплитудно-фазовая частотная характеристика для какого-либо воздействия находится по передаточной функции этого воздействия при замене в ней параметра s на $i\omega$, где ω — угловая (циклическая) частота изменения входного воздействия. Так, амплитудно-фазовая частотная характеристика для воздействия температуры среды $t(\tau)$ — функция $Y_t(i\omega)$. Модуль и аргумент этой функции определяют две другие частотные характеристики — амплитудно-частотную $A_t(\omega)$ и фазо-частотную $\Phi_t(\omega)$:

$$A_t(\omega) = \text{mod } Y_t(i\omega), \quad \Phi_t(\omega) = \arg Y_t(i\omega). \quad (4.54)$$

Аналогичным образом находят частотные характеристики для влияющих воздействий $f_i(\tau)$ (см. выражение (4.8)). Следуя определениям (4.48), функции (4.54) можно назвать главными, или основными, частотными характеристиками ИПТ.

Для однородных термоприемников, выбирая в первом приближении передаточную функцию (4.49) и вводя в рассмотрение обобщенную частоту

$$\Omega = \omega\varepsilon, \quad (4.55)$$

на основе (4.54) находим (рис. 4.7)

$$A_t(\Omega) = \frac{a_{э}}{a_t} = \frac{1}{\sqrt{1 + \Omega^2}}, \quad (4.56)$$

$$\Phi_t(\Omega) = -\arctg \Omega. \quad (4.57)$$

Из выражений (4.54) — (4.57) следует, что амплитудно-частотная характеристика определяет отношение амплитуды колебаний темпера-

туры термоприемника a_z к амплитуде колебаний температуры среды a_t , рассматриваемое в зависимости от частоты колебаний ω температуры $t(\tau)$. Фазочастотная характеристика $\Phi_t(\omega)$ отражает зависимость от частоты ω сдвига по фазе между входным $t(\tau)$ и выходным $t_z(\tau)$ сигналами ИПТ.

Максимальное отставание в показаниях термоприемника $t_z(\tau)$ при измерении периодически изменяющейся температуры среды $t(\tau)$ в моменты времени, далекие от начального, и при нулевом сигнале от возмущающих факторов $t_{вл}(\tau) = 0$ находится по формуле

$$\Delta_{\text{макс}} = |t_z(\tau) - t(\tau)|_{\text{макс}} = a_t \frac{\Omega}{\sqrt{1 + \Omega^2}}. \quad (4.58)$$

При заданном $\Delta_{\text{макс}}$ минимально допустимый период колебаний $T = 2\pi/\omega$ температуры среды приближенно определяется неравенством

$$\frac{T}{\varepsilon} \geq 2\pi \frac{a_t}{\Delta_{\text{макс}}}. \quad (4.59)$$

При более точных приближениях для описания динамики реальных многосоставных и однородных термоприемников используют передаточные функции второго и высших порядков по сравнению с (4.49). Возможны и практически применяются два подхода: аналитический (структурный) и расчетно-экспериментальный. В первом задается исходная структура ИПТ и выводятся уравнения теплообмена, решения которых определяют вид передаточных функций. Для однородных термоприемников таковыми являются уравнения (4.13), (4.17) и система передаточных функций (4.21), (4.22), из которых могут быть найдены передаточные функции разных порядков приближения и соответственно определены приближенные уравнения взаимосвязи измеренной температуры и воздействий.

Сложные технические термоприемники, состоящие из разнородных конструктивных элементов с различными физическими свойствами, представляют систему тел, температурное поле которой является неравномерным. Чтобы математический анализ теплообмена не был чрезмерно громоздким, а исследование методических погрешностей не превратилось в самоцель, далекую от реальных измерений температуры, сложный термоприемник заменяют двумя или несколькими элементами, а затем формулируют приближенные уравнения теплообмена и решают их.

При исходной разбивке термоприемника на n элементов, каждый из которых характеризуется собственными значениями теплоемкости и температуры, передаточная функция любого из элементов может быть обобщенно записана в следующем виде:

$$Y(s) = \frac{b_0 + b_1 s + \dots + b_{m-1} s^{m-1} + b_m s^m}{a_0 + a_1 s + \dots + a_{n-1} s^{n-1} + a_n s^n} = \frac{T_z(s)}{T(s)} \quad (m \leq n), \quad (4.60)$$

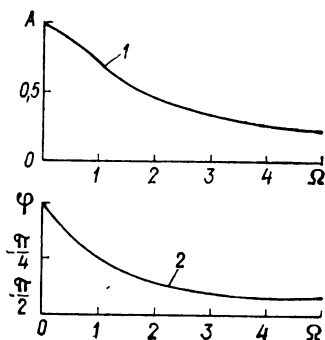


Рис. 4.7. Частотные характеристики ИПТ:

1 — амплитудно-частотная; 2 — фазочастотная.

где коэффициенты $a_0, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m$ находятся решением исходной системы уравнений теплообмена или разложением трансцендентных передаточных функций в степенные ряды, если для описания теплообмена составного термоприемника использовались уравнения в частных производных (модели ИПТ с распределенными параметрами). Структура коэффициентов, входящих в (4.60), т. е. формулы для нахождения их значений, определяются в процессе аналитического решения задачи. Если термоприемник взаимодействует только с окружающей средой, а помехи отсутствуют, то в соответствии с (4.48) и используя для $Y_t(s)$ выражение (4.60), получают дифференциальное уравнение взаимосвязи измеренной $t_{\Sigma}(\tau)$ и действительной $t(\tau)$ температур:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n t_{\Sigma}}{d\tau^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} t_{\Sigma}}{d\tau^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dt_{\Sigma}}{d\tau} + a_0 t_{\Sigma} = \\ = b_m \frac{d^m t}{d\tau^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} t}{d\tau^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dt}{d\tau} + b_0 t, \end{aligned} \quad (4.61)$$

которое является обыкновенным дифференциальным уравнением n -го порядка с постоянными коэффициентами.

Расчетно-экспериментальный подход к нахождению динамических характеристик основывается на возможности «навязывания» изучаемому ИПТ заранее выбранных передаточных функций (4.60), или уравнения (4.61), или соотношений других видов. При таком подходе структура и значения коэффициентов уравнений (4.60) и (4.61) для конкретного ИПТ не известны и подлежат экспериментальному определению подачей на вход термоприемника сигнала заданной формы и записи выходного сигнала с последующим его анализом. В практике исследования ИПТ наиболее часто на вход подают скачкообразное воздействие, а найденную кривую изменения температуры $t_{\Sigma, \text{пер}}(\tau)$, т. е. переходную характеристику ИПТ, обрабатывают графически или с помощью ЭВМ. При экспериментальном исследовании динамики сложных термоприемников вид получаемой передаточной функции и значения ее коэффициентов для одного и того же ИПТ могут быть разными при различных внешних условиях теплообмена.

Из-за инструментальных погрешностей, погрешностей обработки кривых переходного процесса, а также нестабильности условий конвективно-лучистого теплообмена передаточная функция ИПТ при ее экспериментальном определении обычно не содержит более трех-четырех коэффициентов. Если передаточная функция ИПТ определена в виде

$$Y_t(s) = \frac{T_{\Sigma}(s)}{T(s)} = \frac{1 + h_1 s}{1 + a_1 s + a_2 s^2} = \frac{1 + b_1 s}{(1 + \varepsilon_1 s)(1 + \varepsilon_2 s)}, \quad (4.62)$$

где $\varepsilon_{1,2} = \frac{1}{2} [a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_2}]$, то уравнение переходного процесса при $T(s) = t/s$ имеет вид (см. кривую 2 на рис. 4.6):

$$\frac{t_{\Sigma, \text{пер}}(\tau)}{t} = 1 - B_1 \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon_1}\right) + B_2 \exp\left(-\frac{\tau}{\varepsilon_2}\right), \quad (4.63)$$

где

$$B_1 = \frac{h_1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}, \quad B_2 = \frac{b_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}. \quad (4.64)$$

Соответственно для амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик получаем следующие выражения:

$$A_f(\omega) = \sqrt{\frac{1 + b_1^2 \omega^2}{(1 + \varepsilon_1^2 \omega^2)(1 + \varepsilon_2^2 \omega^2)}} = \sqrt{\frac{1 + b_1^2 \omega^2}{(1 - a_2 \omega^2)^2 + a_1^2 \omega^2}} \quad (4.65)$$

$$\begin{aligned} \varphi(\omega) &= \arctg \left(\omega \frac{b_1 - a_1 - a_2 b_1 \omega^2}{1 + (a_1 b_1 - a_2) \omega^2} \right) = \\ &= \arctg(b_1 \omega) - \arctg \frac{a_1 \omega}{1 - a_2 \omega^2}. \end{aligned} \quad (4.66)$$

4.7. Оценка случайной составляющей методической погрешности

При анализе воздействия на ИПТ входных сигналов (основного и помехосоздающих) предполагалось, что закономерности изменения их от времени заранее определены, т.е. эти воздействия являются детерминированными. Более точно, все входные сигналы в реальных условиях не жестко заданные, и их следует считать случайными функциями времени. Типичный пример — изменение температуры и скорости движения потока газа или жидкости при турбулентном нестационарном режиме его течения. При турбулентном движении скорость и температура в выбранной точке потока неупорядоченно изменяются, пульсируют около некоторых средних значений. Эти пульсации наблюдаются и в случае, когда средняя скорость и температура потока постоянны во времени, т.е. течение является стационарным и изотермическим. Для турбулентного потока понятие его истинной температуры теряет свою ценность, и при ее количественном определении используют вероятностные характеристики, применяемые в теории случайных (стохастических) процессов.

Для характеристики случайной функции $f_{сл}(\tau)$, отображающей случайный физический процесс (например, процесс изменения температуры турбулентного потока), используют различные понятия. Наиболее употребительными из них являются следующие: 1) среднее значение (математическое ожидание) $\bar{f}_{сл}(\tau)$ случайной функции $f(\tau)$; 2) дисперсия $\sigma_f^2(\tau)$ и среднеквадратичное отклонение $\sigma_f(\tau)$.

Среднее значение случайной функции $f_{сл}(\tau)$ представляет кривая $\bar{f}_{сл}$, около которой располагаются все возможные реализации случайной функции. Величины σ_f^2 и σ_f определяют отклонение, рассеивание возможных реализаций случайной функции около $\bar{f}_{сл}$ кривых $f_{сл}(\tau)$. Если характеристики $\bar{f}_{сл}$, σ_f^2 и σ_f зависят от аргумента τ , то случайный процесс называют нестационарным. Наиболее подробно разработана теория стационарных случайных функций (процессов), для которых среднее значение (математическое ожидание) и дисперсия не зависят от времени.

Несмотря на случайный характер изменения физической величины, между ее значениями при различных значениях аргумента (например, при различных значениях времени или в различных точках пространства) существует определенная связь. Для оценки этой взаимосвязи применяется корреляционная, или автокорреляционная, функция. Корреляционная функция стационарного случайного процесса $K_f(\tau_n)$ зависит только от интервала τ_n между двумя значениями

случайного процесса и может быть получена в результате осреднения по времени произведения случайных функций $f_{\text{сл}}(\tau)$ и $f_{\text{сл}}(\tau + \tau_n)$. Корреляционная функция $K_f(\tau_n)$ обладает свойством четности, положительна и уменьшается с ростом τ_n , что отражает факт ослабления взаимосвязи значений функции $f_{\text{сл}}(\tau)$, разделенных интервалом τ_n . Крайние значения корреляционной функции позволяют определить среднее значение, дисперсию и среднеквадратичное отклонение случайного процесса:

$$\bar{f}_{\text{сл}} = \sqrt{K_f(\infty)}, \quad (4.67)$$

$$\sigma_f^2 = K_f(0) - K_f(\infty), \quad \sigma_f = \sqrt{K_f(0) - K_f(\infty)}, \quad (4.68)$$

где $\bar{f}_{\text{сл}}$ — среднее по времени значение функции $f_{\text{сл}}(\tau)$, причем $\bar{f}_{\text{сл}} = \bar{f}_{\text{сл}}$, а $K_f(0)$ и $K_f(\infty)$ — значения соответственно при $\tau_n = 0$ и $\tau_n = \infty$.

Конкретная структура автокорреляционных функций находится экспериментально. В практике температурных измерений (анализ турбулентных течений, атмосферная турбулентность) для аппроксимации корреляционной функции применяют различные выражения, из которых наиболее используются следующие:

$$K_f(\tau_n) = \sigma_f^2 e^{-\mu|\tau_n|} \quad (\mu > 0), \quad (4.69)$$

$$K_f(\tau_n) = \sigma_f^2 e^{-\mu|\tau_n|} \cos \beta \tau_n \quad (\mu > 0), \quad (4.70)$$

где μ и β — экспериментально определяемые постоянные величины.

Оценка случайной составляющей методической погрешности при измерениях может быть выполнена после исследования прохождения входного случайного сигнала через звенья всей измерительной цепи и получения характеристик случайного сигнала на выходе. В общем случае требуется детальный анализ входных случайных сигналов, учет их воздействия на динамическую характеристику ИПТ и ПВ. В зависимости от конкретных условий существенно изменяется методика и трудоемкость выполняемых оценок случайной составляющей погрешности измерений.

Реальный входной сигнал $f(\tau)$ можно разделить на детерминированную $f_{\text{дет}}(\tau)$ и случайную $f_{\text{сл}}(\tau)$ составляющие и анализировать их прохождение через ИПТ отдельно:

$$f(\tau) = f_{\text{дет}}(\tau) + f_{\text{сл}}(\tau). \quad (4.71)$$

Такой подход требует предварительного обоснования, однако как первое приближение может быть использован при оценке характеристик случайной составляющей сигнала на выходе ИПТ.

При указанных выше допущениях детерминированная составляющая $f_{\text{дет}}(\tau)$ находится как среднее значение (математическое ожидание) $\bar{f}(\tau) = \bar{f}(\tau)$ входного сигнала. Прохождение этого сигнала через ИПТ анализируется по обычным правилам (см. уравнения (4.8), (4.20)), в результате применения которых получают значение детерминированной составляющей температуры чувствительного элемента ИПТ $T_{\text{э. дет}}(\tau)$. Зная $T_{\text{э. дет}}(\tau)$, по уравнению (4.34) определяют систематическую составляющую методической погрешности.

Случайная составляющая рассматривается как стационарная случайная функция данного входного сигнала, ее среднее значение

(математическое ожидание) равно нулю, т. е. $\tilde{f}_{\text{сл}} = 0$. Дисперсия σ_f^2 и среднеквадратичное значение σ_f определяются заданием соответствующей корреляционной функции входного сигнала (4.69), (4.70) и соотношением (4.68). Среднее значение стационарной случайной функции на выходе ИПТ равно нулю, т.е. $\tilde{T}_{\text{э. сл}}(\tau) = 0$. Взаимосвязь дисперсий случайных составляющих выходного и входного сигналов находится по общим правилам с учетом заданной структуры динамических характеристик ИПТ.

Наиболее простые инженерные оценки получаются для однородных термоприемников, имеющих передаточную функцию вида (4.49). Если случайная составляющая температуры среды $T_{\text{сл}}(\tau)$ характеризуется корреляционной функцией (4.69) и имеет дисперсию $\sigma_{T_{\text{сл}}}^2$, то дисперсия $\sigma_{T_{\text{э}}}^2$ на выходе ИПТ в установившемся режиме находится по формуле

$$\frac{\sigma_{T_{\text{э}}}^2}{\sigma_{T_{\text{сл}}}^2} = \frac{y_t^2}{1 + \mu\varepsilon}. \quad (4.72)$$

Если корреляционная функция входного сигнала $T_{\text{сл}}(\tau)$ имеет вид (4.70), то для ИПТ с передаточной функцией (4.49) справедливо соотношение

$$\frac{\sigma_{T_{\text{э}}}^2}{\sigma_{T_{\text{сл}}}^2} = \frac{1 + \mu\varepsilon}{(1 + \mu\varepsilon)^2 + \beta^2\varepsilon^2 y_t^2}. \quad (4.73)$$

Таким образом, при действии на вход ИПТ температуры среды

$$T(\tau) = T_{\text{дет}}(\tau) + T_{\text{сл}}(\tau) \quad (4.74)$$

на выходе ИПТ будет формироваться сигнал

$$T_{\text{э}}(\tau) = T_{\text{э. дет}}(\tau) + T_{\text{э. сл}}(\tau). \quad (4.75)$$

Детерминированная составляющая $T_{\text{э. дет}}(\tau)$ находится в соответствии с (4.8) или (4.20). Дисперсия случайной составляющей $T_{\text{э. сл}}(\tau)$ для ИПТ с передаточной функцией (4.49) находится по формулам (4.72) и (4.73) в соответствии с (4.69), (4.70).

Соотношения (4.72) и (4.73) справедливы только для стационарных линейных ИПТ, т.е. для таких ИПТ, параметры которых не изменяются под воздействием входного сигнала. Отклонение от этого условия приводит к возникновению так называемых параметрических эффектов и появлению дополнительных погрешностей, носящих также случайный характер. Так, при измерении температуры турбулентного потока случайные пульсации скорости течения вызывают случайные изменения конвективной составляющей коэффициента теплоотдачи и соответственно показателя тепловой инерции ИПТ ε (см. (4.31)), являющегося одним из основных параметров передаточных функций (4.21), (4.49).

Математические формулировки таких задач и анализ методических погрешностей измерения температуры сред с учетом переменности коэффициента теплоотдачи в разных приближениях требуют отдельного рассмотрения.

Вклад в случайную составляющую выходного сигнала могут давать и не указанные выше воздействия, например, влияние электро-

магнитного поля на показания электрических термометров сопротивления и термопар, возникновение внутренних шумовых помех, вызванных условиями работы элементов измерительной системы. Учет каждого такого воздействия требует дополнительного анализа.

4.8. Выбор средства измерения температуры

Достоверность результатов измерения температуры обычно определяется тем, насколько удачно выбран метод и средство измерения для данного конкретного объекта и условий.

Требования высокой точности измерения температур заставляют осуществлять предварительное изучение факторов, вызывающих искажение нормальной работы как первичного преобразователя, так и средств накопления, хранения и переработки измерительной информации. Должна быть выявлена номенклатура таких влияющих факторов, характер и диапазоны их изменения, а также функции влияния каждого фактора на работу измерительной аппаратуры. Учет изменчивости влияющего фактора и его функции влияния позволяет определить частное детерминированное воздействие фактора на результат измерения, определить одну из составляющих возникающей систематической погрешности измерений. Случайные, нерегулярные колебания интенсивности влияющего фактора относительно принятой для него регулярной изменчивости вызовут возникновение частных случайных погрешностей. Рассмотрим важнейшие факторы.

Требуемая точность измерения непосредственно определяется допускаемым значением δ_x суммарной погрешности результата измерений. Из этого значения должна быть выделена часть δ_{xp} , определяющая допускаемые значения случайной и систематической составляющей погрешности регистрации результатов измерений. Остальная часть δ_x определит значение δ_{xn} , используемое в дальнейшем анализе для выбора первичного преобразователя. Если постановка задачи допускает проведение ряда из m единичных наблюдений, то, очевидно, можно положить

$$\delta_{xn} = \sqrt{\frac{S_x^2}{m} + \frac{\Theta_n^2}{3}}, \quad (4.76)$$

где S_x — оценка допускаемого значения суммарной случайной погрешности одиночного наблюдения, а Θ_n — оценка неисключенных остатков систематической составляющей погрешности, в частности оценка градуировочной погрешности первичного преобразователя.

Исходя из заданного значения δ_{xn} , по уравнению (4.76) определяют соотношение между S_x и Θ_n . Суммарное значение S_x случайной составляющей складывается из допускаемых частных значений S отдельных n случайных погрешностей, возникающих в процессе единичного наблюдения. Если принять, что допускаемое суммарное значение S_x составляется из равномерного вклада всех n частных погрешностей S , то $S_x^2 = nS^2$. Из этого соотношения находят допускаемое значение S случайной составляющей каждой частной погрешности. В результате анализа источников частных погрешностей может оказаться, что некоторые из них дают значительно меньший вклад, чем допускаемое для них значение S . Тогда для других, более критичных погрешностей допускаемое значение S можно соответственно увеличить.

Как правило, погрешность градуировки или очередной периодической поверки первичного преобразователя и измерительной аппаратуры должна быть существенно меньше, чем допускаемая погрешность измерения каждым из этих двух составляющих или всей измерительной системы в целом.

Однако в ряде технологических процессов успешно применяются средства измерений, обладающие достаточно высокой разрешающей способностью и достаточно малой вариацией показаний, но не имеющих надежных поправок, обусловленных систематической составляющей их погрешности. В этом случае технологический режим ведется по условным показаниям средства измерения, отличающимся от действительных значений измеряемой температуры. Эти условные показания устанавливаются либо в процессе отладки технологического процесса, либо с помощью образцового прибора, помещаемого совместно с данным средством измерений. При этом производится поверка средства измерения на месте его эксплуатации с последующим учетом полученной поправки.

Воспроизводимость результатов измерений. Обычно принято рассматривать невоспроизводимость измерений, обусловленную вариацией v показаний регистрирующей аппаратуры и случайными погрешностями ИПТ. При этом следует учитывать, что паспортное значение вариации v показаний прибора дает разброс показаний, т.е. наибольшую разность между максимальным и минимальным показаниями при одном и том же значении измеряемой величины на входе. Поэтому разброс показаний характеризуется половиной вариации ($v/2$). Поскольку вариация дает максимальное значение отклонений, среднюю квадратичную погрешность, обусловленную вариацией регистрирующего прибора, следует принимать равной $v/6$.

Наряду с воспроизводимостью результатов измерений одним прибором важно обеспечить сопоставимость результатов измерения одного и того же значения различными приборами (приборами разных типов). При правильной организации измерительного процесса расхождение показаний двух приборов не должно превышать суммы допускаемых погрешностей каждого из них.

Длительность процесса измерений Δt . Эта характеристика изучаемого процесса в основном является определяющей при выборе метода и средства измерения температуры. При длительности меньше миллисекунды применение контактных методов приводит к чрезмерно большим динамическим погрешностям и более эффективным оказывается использование аппаратуры бесконтактного измерения температур. Иногда, при измерениях высоких температур газов или жидкостей, приходится искусственно уменьшать длительность измерительного процесса во избежание чрезмерного перегрева первичного преобразователя. При этом измеряемое значение температуры находится расчетным путем по переходной кривой нагрева преобразователя.

Динамика измеряемой температуры. Сложность и изменчивость теплообмена объекта с окружающими телами приводят к тому, что объекты со строго постоянной температурой как в природе, так и в условиях промышленного производства встречаются крайне редко. Зачастую изменение температуры объекта происходит настолько медленно, что в первом приближении температура рассматривается как постоянная. Возникает необходимость уточнить понятие «стационарной температуры» с позиций техники измерений.

Экспериментально степень непостоянства температуры объекта может быть определена по предварительным результатам, по крайней мере, двух измерений, выполненных одним и тем же прибором и разделенных друг от друга на интервал времени Δt . Разность получен-

ных отсчетов $u(\tau_1)$ и $u(\tau_2)$ из-за близости этих величин можно считать свободной от систематических погрешностей метода и прибора, значения которых в обоих отсчетах будут практически одинаковы. Поэтому можно полагать, что значения $u(\tau_1)$ и $u(\tau_2)$ искажены только случайными погрешностями $\Delta u(\tau_1)$ и $\Delta u(\tau_2)$. Допустимо также предположение, что $\Delta u(\tau_1) = \Delta u(\tau_2) = \Delta u(\tau)$. Следовательно,

$$v(t) = \frac{u(\tau_1) - u(\tau_2)}{\Delta\tau}, \quad \Delta v(t) = \frac{\sqrt{2} \Delta u(\tau)}{\Delta\tau}. \quad (4.77)$$

Таким образом, если измеренное значение скорости $v(t)$ монотонного изменения температуры объекта окажется больше погрешности $\Delta v(t)$, то с вероятностью, соответствующей доверительной вероятности оценки случайной погрешности $\Delta u(\tau)$, можно утверждать реальность установленной нестациональности температуры.

Понятие стабильности температуры объекта носит вероятностный характер и должно относиться к конкретному значению интервала времени $\Delta\tau$.

При установленном «дрейфе» температуры объекта выбор метода и средства измерений должен предусматривать либо возможность снижения возникающей при измерениях динамической погрешности до значения, не превышающего допускаемое значение S частной погрешности (см. формулу (4.76)), либо возможность введения поправки на динамическую погрешность с неопределенностью этой поправки, не превышающей значения S .

Ожидаемые значения измеряемых температур. Температура плавления основных конструктивных деталей ИПТ является естественным верхним пределом температур, измеряемых контактным преобразователем данного типа. Но ограничения в применении контактных ИПТ возникают уже при температурах значительно более низких, чем температура плавления деталей. Эти ограничения вызваны неустойчивостью (изменением во времени) градуировочной характеристики ИПТ, тем более сильной, чем выше измеряемая температура. В резистивных контактных ИПТ неустойчивость градуировочной характеристики обусловлена испарением металла чувствительного элемента, а в термоэлектрических — явлениями неодинаковой возгонки составляющих сплавов термоэлектродов и, как следствие, изменением термоЭДС.

К определению предельного значения температуры стабильной работы ИПТ следует подходить с тех же позиций, какие были использованы при определении понятия нестационарной температуры. Неустойчивость градуировочной характеристики ИПТ при данной температуре $t_{кр}$ также является понятием вероятностным. Если изменение градуировочных данных $u(\tau_1) - u(\tau_2)$, найденных через промежуток времени $\Delta\tau$, который определяет длительность его работы при $t_{кр}$, превышает значение погрешности $\frac{\sqrt{2}\Delta u(\tau)}{\Delta\tau}$, для оцененной с заданной доверительной вероятностью погрешности $\Delta u(\tau)$ градуировки, то с этой степенью вероятности можно утверждать, что градуировочная характеристика ИПТ для данной $t_{кр}$ является неустойчивой. В противном случае изменение градуировочной характеристики считается незакономерным, и ей следует приписать допускаемую частную погрешность S , рассчитанную по формуле (4.76).

Физические свойства объекта. Однородность его температурного поля. Для измерения температур объекта в твердом, жидком или газообразном состояниях могут быть использованы как контактные, так и бесконтактные средства измерений со специфическими конструк-

тивными особенностями, которые учитывают условия теплообмена первичного преобразователя с объектом. Особую группу объектов составляют пламена, для которых применение контактных методов крайне ограничено из-за нарушений зон горения, неизбежно создаваемых контактным преобразователем. Практически все методы измерений температур пламен основаны на использовании различных свойств теплового излучения пламени и являются бесконтактными.

Существенные ограничения в применимости контактных методов возникают при необходимости измерения локальных температур в неоднородном температурном поле исследуемого объекта. Всякий контактный измеритель вносит искажения в исследуемое температурное поле, осуществляя некоторое осреднение значений температур в сфере пространства внутри объекта, диаметр которой превышает габаритные размеры преобразователя. Соотношение диаметра сферы «возмущенного» пространства объекта и определяющего размера преобразователя находят, решая задачу теплообмена.

Существенно искажаются результаты измерения температур в градиентном поле при использовании в этих условиях бесконтактных методов. Резко нелинейный характер зависимости мощности излучения в видимой и близкой инфракрасной областях спектра от температуры поверхности объекта приводит к тому, что преобразователи, реагирующие на величину спектральной или интегральной мощности излучения, дают не осредненное значение температуры по визируемой области объекта, а близкое к максимальному значению.

Агрессивность объекта, приводящая к возникновению и развитию нестабильности контактного ИПТ. Как правило, интенсивность химических взаимодействий объекта и материалов ИПТ быстро возрастает по мере повышения измеряемой температуры, так же, как и взаимодействия разных материалов, составляющих преобразователь.

Механизм химического воздействия среды на ИПТ заключается в образовании внутри материала кристаллов из карбидов или оксидов основного вещества, которые, обладая коэффициентом линейного расширения, отличающимся от коэффициентов линейного расширения кристаллов основного вещества, создают по мере повышения температуры внутренние напряжения в чувствительном элементе, изменяющие его физические свойства, а следовательно, и градуировочную характеристику.

К этой категории воздействий объекта, вызывающих необратимые изменения свойств ИПТ, относится действие нейтронных потоков в атомных реакторах, часто приводящее к преобразованиям химических элементов в материалах преобразователя. Учесть возникающие при этом погрешности температурных измерений, обусловленные изменением градуировочной характеристики преобразователя, трудно, и, во всяком случае, достоверность таких поправок невелика. Поэтому необходимо обращать особое внимание на защиту преобразователя от химического взаимодействия с объектом и от воздействия потока нейтронов.

Свойства среды, окружающей объект. При бесконтактном методе измерения температур среда, окружающая объект, является одним из основных источников возникновения систематических, а при нестабильных свойствах среды — и случайных составляющих погрешностей измерений температур. Трудно контролируемое ослабление теплового излучения объекта, доходящего до первичного преобразователя, нельзя заранее надежно определить и учесть соответствующей системой коррекции показаний прибора.

Правильное действие контактного ИПТ, установленного на объекте, в сильной степени зависит от состояния среды, окружающей объект,

от того, насколько установка преобразователя нарушает теплообмен объекта с окружающей средой и насколько теплообмен преобразователя со средой вызывает искажение его градуировочной характеристики. Особенно сильное влияние на работу контактного ИПТ оказывают поля интенсивного теплового излучения, когда измерения температур осуществляются внутри пространства с нагретыми стенками или вблизи факела пламени. В этих условиях приходится применять специальные защиты от теплового излучения.

При длинных линиях связи колебания температуры промежуточной среды могут вызвать настолько значительные схемные погрешности измерений при использовании типовых резистивных приборов, что возникает необходимость пересмотра вопроса о целесообразности применения этого метода измерений.

Уровень случайных помех. Кроме частных случайных погрешностей, обусловленных нерегулярными колебаниями воздействий влияющих факторов, уровень помех, ограничивающих возможность измерения малых сигналов, вызывается также тепловыми шумами в активных резистивных элементах и уровнем случайных пульсаций тока в измерительных цепях, индуцированных переменными электромагнитными полями. Снижение уровня электромагнитных помех достигается соответствующим экранированием измерительных цепей. Однако уровень шумов радиоэлектронной аппаратуры не всегда удается снизить до требуемой величины, и минимальное его значение приходится учитывать при определении динамического диапазона измерений.

Существует ряд методов выделения полезного сигнала из уровня шумов. Они довольно эффективны в применении к регулярным измеряемым сигналам. При измерении случайных процессов с неизвестной корреляционной функцией надежное измерение осуществляется при отношении сигнал/шум не менее 2.

Вибрационные и ударные нагрузки. Учет наличия вибрационных и ударных нагрузок, которые действуют на ИПТ, смонтированный на объекте, важен прежде всего с точки зрения обеспечения прочностных свойств преобразователя. Однако воздействие на ИПТ вибрационных или ударных ускорений, благодаря тензометрическому эффекту, может стать причиной возникновения в измерительной цепи нового источника помех. Наряду с этим, следует учитывать, что амортизация ИПТ может привести к паразитному тепловому сопротивлению между преобразователем и объектом и стать источником систематической погрешности измерения температуры объекта.

• **Регистрация результатов измерений.** Необходимость регистрации результатов измерений температур с целью накопления и последующего хранения измерительной информации заставляет вводить в измерительную цепь дополнительные функциональные блоки, являющиеся источниками дополнительных погрешностей измерений. Поэтому регистрация результатов измерений осуществляется всегда с погрешностями, превышающими погрешности прямых измерений.

Серийно выпускаемая аппаратура для регистрации на диаграммной бумаге обеспечивает фиксацию результатов измерений в функции времени с погрешностью 0,5 % диапазона шкалы. В эту величину входят как градуировочная погрешность, так и временная нестабильность показаний и вариация прибора. Эту цифру трудно снизить и довести до 0,25 — класса точности аппаратуры в режиме измерений, так как основная составляющая погрешности обуславливается свойством бумажной диаграммной ленты изменять свои размеры в зависимости от изменяющейся влажности воздуха в помещении, где установлена аппаратура.

4 Задача выбора средства измерений формально сводится к поиску по каталогам наиболее подходящего по своим метрологическим и конструктивным параметрам прибора, с учетом всех перечисленных выше факторов. Подобного рода поисковые задачи решаются с помощью ЭВМ. Но целесообразность привлечения ЭВМ должна определяться степенью важности подготавливаемого эксперимента по измерению температур. Решение о выборе того или иного средства измерения температуры в ответственных случаях должно приниматься специалистом высокой квалификации, умеющим правильно оценить условия эксперимента и установить возможные в этих условиях источники погрешностей измерений температур.

Подвижность молекул, а следовательно, интенсивность объемного и линейного термического расширения у жидкостей значительно больше, чем у твердых тел. Поэтому жидкость, заполняющая твердотельный сосуд, с ростом температуры оказывается в избытке, а при уменьшении — в недостатке. Это явление и положено в основу всех ЖСТ. Конструктивная схема ЖСТ включает резервуар, содержащий термометрическую жидкость, и присоединенный к нему капилляр, частично заполненный избыточной жидкостью. Об измеряемой температуре резервуара судят по высоте столбика жидкости в капилляре при помощи шкалы, которую наносят либо прямо на стекло капилляра (палочный вариант), либо на специальную пластину, прочно, но эластично соединенную с капилляром. Исторически ЖСТ были первыми термометрами, получившими массовое распространение. Такие достоинства, как неприхотливость, простота в обращении, дешевизна, постоянство характеристик, обеспечили широкое их применение вплоть до настоящего времени. Диапазон измерения от -200 до 1200°C . Только в СССР более 650 типов ЖСТ производятся и потребляются в количествах, измеряемых многими десятками миллионов штук в год. Основными поставщиками ЖСТ в СССР являются Клинский (Моск. обл.) и Лохвицкий (Полт. обл.) заводы. Первый специализирован преимущественно на термометрах с металлическим заполнением, второй — на термометрах с органическими термометрическими жидкостями.

Использование ртути открывает возможность образования неокисляемых электрических контактов, что привело к широкому применению ртутных термоконтактных устройств в системах контроля и регулирования.

Недостатки ЖСТ обусловлены трудностями непрерывного сочтения их с электрическими системами дальнейшей переработки первичной информации. Поэтому в некоторых областях ЖСТ вытесняются термоэлектрическими и резистивными термометрами.

5.1. Термометрические стекла

Общие требования к готовым стеклам, идущим на изготовление ЖСТ в серийном заводском исполнении, нормированы ГОСТ 1224—71. Химический состав и технология приготовления стекла должны соответствовать технической документации, утверждаемой в установленном порядке. Стандартом предусмотрены следующие марки термометрических стекол: 360; 500; 650. Цифровое обозначение марки стекла соответствует верхнему пределу шкалы ЖСТ в градусах Цельсия. Для измерения более высоких температур используется плавление

ный кварц, технологические качества которого регламентированы руководствами по стеклодувным работам.

Химическая стойкость термометрических стекол должна быть высокой. В условиях, нормированных ГОСТ 21400—75, потери массы в щелочной среде не должны превышать $1,5...2,0 \text{ мг/см}^2$, в кислой — $0,01...0,15 \text{ мг/см}^2$. При стеклодувной обработке стекла не должны терять прозрачности и кристаллизоваться.

Старение стекол. После стеклодувной обработки в изделиях возникают и сохраняются достаточно большие внутренние напряжения, релаксация которых со временем приводит к изменению размеров. Во всем диапазоне рабочих температур термометров стекло, в принципе, продолжает оставаться вязкопластичной массой. Полученное раздуванием изделие стремится к сокращению, что приводит к необоснованному увеличению показаний. Релаксационная деформация вызывает искажение, величина которого, начиная от $1...5 \text{ К}$ в год, регулярно уменьшается.

Для устранения релаксационных погрешностей применяют искусственное старение, при котором изделие нагревают до температуры, не доходящей до температуры начала размягчения на $5...20 \text{ К}$, выдерживают в течение 3 ч, затем в течение последующих 3 ч снижают температуру на $10...20 \text{ К}$ и выдерживают 6 ч, после чего медленно снижают температуру до комнатной. Перегрев в процессе старения может вызвать деформацию изделий и, следовательно, брак. В связи с этим можно увеличить недогрев до температуры начала размягчения на $20...30 \text{ К}$, выдержать при этой температуре 20 ч, затем медленно, в течение $20...30 \text{ ч}$, снизить температуру до комнатной.

Несмотря на искусственное старение в течение первого года происходит рост показаний на $(2...5) \cdot 10^{-2} \text{ К}$. В дальнейшем процесс затухает, однако о нем следует помнить при употреблении старых ЖСТ в измерениях с высокой точностью.

Для проверки хода естественного старения при хранении после обязательного искусственного старения изготавливают партию из трех термометров с ценой деления $0,01 \text{ К}$ и пределами измерения от $-0,8$ до $1,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$. В приборе тройной точки воды производится отсчет нулевой точки по методике для определения депрессии. По истечении одного года хранения при температуре $(20 \pm 5) \text{ }^{\circ}\text{C}$ градуировку повторяют. Повышение нулевой точки не должно выходить за следующие пределы: для стекол марки 360— $0,04 \text{ К}$; 500— $0,03 \text{ К}$; 650— $0,02 \text{ К}$.

При температурах, соответствующих верхнему пределу шкалы, процесс старения протекает значительно скорее. Для определения склонности стекла к старению в таких условиях проводят испытания партии термометров на смещение нулевой точки, выдерживая их в течение 6 ч при температуре, соответствующей верхнему пределу шкалы. Значение смещения для различных стекол и верхних значений рабочих температур допускается в пределах $0,30...1,60 \text{ К}$. Дальнейший ход смещения шкалы не нормирован. Оценочная поправка может быть определена исходя из экспоненциального закона развития процессов старения в зависимости от интегрального времени экспозиции. Такие расчеты носят очень условный характер, и достоверность их невысокая. Стекла на старение проверяют при изменении химического состава стекловаренной ванны.

Депрессия стекол обусловлена их склонностью к небольшому гистерезису линейных размеров при быстром изменении температуры. Размеры, соответствующие новой установившейся температуре, изделие приобретает только через $15...30 \text{ ч}$. Явление в разной степени свойственно всем сортам стекол, применяемых для ЖСТ, не связано с их старением и наблюдается во всем диапазоне рабочих температур. Все

наблюдения гистерезиса проводились только при снижении температуры (это связано с удобствами эксперимента) и не свидетельствуют о том, что явление не наблюдается при ее возрастании.

Нормированное представление депрессии термометрических стекол связывается со смещением показания термометра при 0 °С после нагрева до 100 °С и определяется как разность показаний термометра при измерении температуры тройной точки воды до и после нагревания до 100 °С. Депрессия зависит от состава стекла, причем повышенному содержанию солей калия и натрия в равных количествах соответствует повышенная депрессия. Наличие только одного из указанных компонентов не способствует повышению депрессии. Для старых термометров депрессия после нагрева до 500 °С достигает 0,6 К.

Нормированная проверка на депрессию обычно проводится после изменения химического состава в стекловаренной ванне. Для этого из испытуемого стекла изготавливается не менее 10 специальных термометров с ценой деления не более 0,02 К, интервалом рабочих температур ± 1 °С, конструкция которых позволяет производить нагрев до 100 °С. Предварительно выдержанные в тающем льде и промытые в дистиллированной воде термометры устанавливают в колодец прибора тройной точки воды, залитый дистиллированной водой так, чтобы нулевая точка была на 4 ... 5 мм выше уровня воды. После выдержки в течение 10 мин с помощью катетометра регистрируется положение тройной точки на шкале каждого термометра не менее трех раз с интервалом 1 мин. Затем термометры выдерживают в кипящей воде (100 ± 3) °С в течение 1 ч, охлаждают до комнатной температуры и повторяют измерение в приборе тройной точки воды. Допустимая депрессия составляет для стекол марки 360—0,05 К; 500—0,05 К и 650—0,01 К. Нормированная депрессия для старых стекол следующая: иенское термометрическое 16^{III}—0,04 К; боросиликатное 59^{III}—0,03 К; верредур — 0,11 К; супермакс 1565^{III}—0,01 К.

Практика и анализ действительных и допустимых погрешностей измерения показывают, что при измерениях температур выше 100 °С невозможно учитывать депрессию стекол. Создать методику внесения точной поправки на депрессию в измерениях очень трудно; очевидно, ее следует учитывать при анализе отдельных составляющих погрешности измерения.

5.2. Термометрические жидкости для ЖСТ

Ртуть среди термометрических жидкостей имеет наиболее широкое распространение. Ее свойства регламентированы ГОСТ 4658—73. Для изготовления термометров применяют ртуть марок Р1 и Р2, которые соответствуют количества примесей, составляющих нелетучий остаток, не более 0,001 % и 0,01 % соответственно. Зависимость плотности ртути от температуры описывается следующими выражениями:

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_t} = 1 + (18182t + 0,78t^2) 10^{-8} \text{ при } 0^\circ\text{C} \leq t \leq 100^\circ\text{C}; \quad (5.1)$$

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_t} = 1 + (18181t + 0,347t^2 + 0,00393t^3 - 20 \cdot 10^{-8}t^4) \cdot 10^{-8} \quad (5.2)$$

при $100^\circ\text{C} \leq t \leq 300^\circ\text{C}$

$$\frac{\gamma_0}{\gamma_t} = 1 + (18223t + 0,131t^2 + 0,00399t^3 + 93 \cdot 10^{-8}t^4) 10^{-8} \quad (5.3)$$

при $200^\circ\text{C} \leq t \leq 500^\circ\text{C}$.

Из приведенных уравнений видно, что нелинейность зависимости плотности от температуры растет с повышением последней, но ее относительное значение невелико, даже при 300 °С нелинейность в зависимости плотности от температуры не превышает 3 %. Этим ртуть выгодно отличается от всех других термометрических жидкостей. При использовании чистой ртути, затвердевающей при $-38,87^{\circ}\text{C}$, нижний предел измерения -30°C (изредка -35°C).

Эвтектические сплавы ртути с металлами третьей группы (In, Ga, Tl) имеют более низкие температуры затвердевания. Так, предложенный еще в начале XX в. Н. С. Курнаковым эвтектический сплав ртути с таллием (8,5 % Tl) затвердевает при температуре ниже -60°C . Добавка специальных лигатур позволяет изготавливать термометры с металлическим заполнением для измерений от -90°C .

Ртуть и ее лигатуры очень ядовиты. Отравление происходит, главным образом, парами ртути через органы дыхания и может носить острый и хронический характер. При эксплуатации и хранении ртутных ЖСТ необходимо контролировать случаи боя и принимать меры к устранению условий отравления. Предельно допустимая концентрация паров ртути в помещении равна $0,01\text{ мг/м}^3$.

Органические жидкости значительно более чувствительны к изменению температуры: их коэффициент температурного расширения на порядок выше, чем у ртути. В качестве термометрических жидкостей широкое применение нашли этиловый спирт (ГОСТ 5962—62), петролейный эфир (ГОСТ 11992—66), керосин (ГОСТ 4753—68), толуол (ГОСТ 5789—78) и пентан. По своей природе они прозрачны в видимой части спектра, что может быть оценено и как достоинство, и как недостаток. Для улучшения условий наблюдения в эти жидкости добавляют красители, чаще всего ярко-красные, с полосой пропускания в окрестности $0,65\text{ мкм}$. Краситель должен проявлять себя только в окраске жидкости, все остальные проявления нежелательны: недо-

Т а б л и ц а 5.1. Термометрические жидкости

Вещество	Химическая формула	$\beta \cdot 10^{-6}, \text{K}^{-1}$	$t, ^{\circ}\text{C}$			
			затвердевания		кипения	
			от	до	от	до
Ртуть	Hg	182,5	$-38,87$		$356,7$	
Таллиевая амальгама	8,5 % Tl	182	-60		360	1460
Сложная амальгама	—	180	-90		360	2000
Галлий	Ga	55	$29,8$		2070	
Ацетон	$\text{CO}(\text{CH}_3)_2$	1310	$-93,9$	$-94,9$	$56,0$	
Керосин		1150	-50	-15	200	290
Пентан	C_5H_{12}	1550	Ниже	-200	30	40
Петролейный эфир	—	1220	Ниже	-100	40	70
Спирт этиловый	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	1100	$-111,8$	$-117,3$	$77,7$	$78,4$
Спирт метиловый	CH_3OH	1220	$-93,9$	$-97,8$	$64,2$	$66,0$
Сероуглерод	CS_2	1210	$-113,0$		$46,0$	
Толуол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	1090	$-92,4$	$-102,0$	$109,2$	$110,6$

пустимы прямая или каталитическая реакция с основной жидкостью, окраска стенок капилляра, изменение окраски жидкости со временем, выпадение осадков и т.п. Приемлемые характеристики получают при окраске анилиновыми красителями.

Конструктивно удачным представляется решение, в котором со стороны, противоположной наблюдателю, в капилляр вносится тонкая цветная полоска. Она находится в оптическом фокусе цилиндрической линзы, образуемой прозрачной жидкостью, которая заполняет капилляр, и хорошо различима на заполненном участке: За пустым каналом полоска трудно различима невооруженным глазом. Аналогичное решение применяется и в термометрах с вложенной шкалой: для улучшения видимости столбика жидкости под капилляром на шкалу наносится черная полоса.

Почти все применяемые термометрические жидкости огнеопасны, летучи, следовательно, взрывоопасны и ядовиты. Но предельно допустимые их концентрации в воздухе на 3 ... 5 порядков больше, чем для ртути, их присутствие легче распознается по запаху, а последствия не так сильны, как при отравлении ртутью. Поэтому эксплуатация термометров с органическими жидкостями не регламентирована специальными требованиями техники безопасности.

Основные характеристики термометрических жидкостей приведены в табл. 5.1.

5.3. Шкалы, чувствительность, погрешности

Шкала термометра устанавливает меру соответствия между вступающим в капилляре столбиком и измеряемой температурой. Конструкции шкал должны гарантировать однозначность механической связи с капилляром и удобство наблюдения положения мениска. Деление шкалы должно опираться на точные значения температур в фиксированных точках и интерполяционные формулы с учетом характера термического расширения термометрической жидкости и стекла. Основные трудности при делении шкалы связаны с нелинейностью свойств жидкостей и стекол. При равномерном делении шкалы в промежутке 0 °C ... 100 °C погрешности за счет деления не превышает 0,05 К. Экстраполяционное деление дает менее надежные результаты. Экстраполирование стоградусной шкалы на ртутном термометре из стекла 1565^{III} до 700 °C приводит к погрешности 75 К. Экстраполяция шкалы, основанной на точках таяния льда и сублимации двуокиси углерода, до температуры кипения азота для пентанового термометра дает погрешность 23 К. В связи с большой надежностью интерполяции у платиновых термометров сопротивления градуировку промежуточных значений шкалы производят по показаниям термометров сопротивления.

Для ртутных ЖСТ в первом приближении высота подъема вершины столбика в капилляре определяется уравнением $H = 18 \times 10^{-5} V_0 S^{-1} \Delta t$, где V_0 — объем резервуара; S — площадь сечения канала в капилляре; Δt — изменение температуры. Так, при $V_0 = 10^{-6} \text{ м}^3 = 1 \text{ см}^3$ и диаметре капилляра около 0,1 мм $H \Delta t^{-1} = 20 \text{ мм} \cdot \text{К}^{-1}$. При шаге деления в 1 мм цена деления равна 0,05 К/дел. Увеличение резервуара и уменьшение сечения капилляра приводят к повышению чувствительности термометрической системы. Практически же емкость резервуара выбирают не более 1 см³, а диаметр канала в капилляре не менее чем несколько сотых долей миллиметра. Такие размеры характерны для стандартных термометров с ценой деления 0,01 К, выпускаемых промышленностью (ТР-1). Дальней-

шее уменьшение диаметра канала в капилляре приводит к различным нежелательным последствиям. Среди них основным является неплавность перемещения вершины столбика, обусловленная, очевидно, вариацией менискового давления вследствие шероховатости внутренней поверхности капилляра. Внешне кажется, что действует явление гистерезиса: на показание термометра начинает влиять не только температура, но и характер, направление ее изменения — одинаковой температуре соответствуют разные показания. Один из приемов частичного устранения гистерезиса состоит в пощелкивании по головке термометра. При точных определениях должны быть регламентированы не только измеренные фиксированные значения, но и подход к ним. Например, при привязке показания термометра к тройной точке воды или в других аналогичных случаях рекомендуется термометр предварительно выдержать в среде, имеющей незначительно большую температуру. При этом подход к фиксируемому значению нормируется по знаку первой производной. Таким образом, в жидко-стеклянных конструкциях осуществима чувствительность, достигающая до 10^{-4} К. Шаг между отметками смежных делений шкалы не допускается менее 0,3 мм. Оцифровка производится через 5 ... 25 делений.

Пределы допускаемых погрешностей показаний термометров в зависимости от пределов измеряемых температур приведены в табл. 5.2.

Таблица 5.2. Пределы допускаемых погрешностей показаний термометров

Диапазон измеряемых температур		Цена деления шкалы, °С							
от	до	0,01	0,02	0,05	0,1 и 0,2	0,5	1	2	5 и 10
—35	0	±0,05	±0,08	±0,10	±0,3	±1,0	±1	±2	±5
0	100	±0,04	±0,08	±0,10	±0,2	±1,0	±1	±2	±5
100	200	—	±0,10	±0,25	±0,4	±1,0	±2	±2	±5
200	300	—	—	±0,40	±1,0	±2,0	±3	±4	±5
300	400	—	—	—	±1,0	±3,0	±4	±4	±10
400	500	—	—	—	—	±3,0	±5	±5	±10
500	600	—	—	—	—	—	±6	±6	±10
600	650	—	—	—	—	—	±6	±6	±15

5.4. Практические особенности измерений ЖСТ

Поправка на температуру выступающего столбика. Условия измерений часто не совпадают с условиями градуировки. В последней, как правило, весь термометр помещается в изотермическое пространство. Практически редко удается поместить весь термометр в область измерения температуры. Обычно в эту область погружается сосуд и некоторая часть столбика жидкости в капилляре. Весь остальной столбик в капилляре имеет другую (непостоянную во времени и пространстве) температуру. В связи с этим при точных измерениях следует вводить поправку на температуру выступающего столбика. Величина поправки даже при больших разностях температур невелика, поэтому

значение поправочной температуры выступающего столбика может быть оценено приближенно.

Существуют конструкции термометров со встроенным вторым термометром, по которому судят о температуре выступающего столбика. Обычно к выступающей части основного термометра теплоизоляционным (асбестовым) шнуром прикрепляется вспомогательный термометр так, чтобы его сосуд находился примерно в середине выступающей части столбика основного термометра.

В связи с приближенным характером практического определения температуры выступающего столбика не требуется обстоятельное интегрирование уравнения температурного расширения столбика. Поправка пропорциональна разности температур и высоте выступающего столбика, что формально записывается следующим образом:

$$\Delta S = b (t - t_m) (S_t - S_b), \quad (5.4)$$

где ΔS — поправка; $S_t - S_b$ — длина выступающего столбика; t — измеряемая температура; t_m — средняя температура выступающего столбика; ΔS , S_t и S_b удобно брать в градусах шкалы основного термометра.

Значения коэффициента пропорциональности поправки на температуру выступающего столбика b для различных условий приведены в табл. 5.3. Так, если ртутный ЖСТ из стекла марки 500 погружен в кипящую воду до деления 30°C , а выступающая часть капилляра находится при температуре 35°C , то поправка составит $0,75^\circ\text{C}$ и ее нужно добавить к зарегистрированному по шкале значению.

Таблица 5.3. Коэффициент поправки на выступающий столбик

Сорт стекла	Жидкость	$b \cdot 10^{-4}$
360	Ртуть	160
500	»	165
650	»	170
Плавленный кварц	»	180
Стекло при $t > 0^\circ\text{C}$	Органическая	1300
Стекло при $t < 0^\circ\text{C}$	»	800

Для специальных условий, например в вискозиметрах, изготавливаются термометры, в которых деления на шкале нанесены с учетом поправки на выступающий столбик и в предположении, что окружающая температура t_m равна 20°C . При измерении температуры таким термометром в неспециальных условиях следует вносить соответствующую обратную поправку.

Для определения среднеинтегральной температуры выступающего столбика существуют специальные термометры, в которых сосуд представляет собой вытянутое цилиндрическое тело с длиной, равной среднему значению длины выступающего столбика.

Если производится большое количество измерений в приблизительно одинаковых условиях, целесообразно отградуировать измерительную аппаратуру, например, по ПТС, а затем пользоваться табличными поправками, применяемыми только для данного ряда измерений.

Чувствительность ЖСТ к давлению. Силовые воздействия, обусловленные перепадом давления, изменяют объем сосуда и поперечное сечение капилляра. Обычно внутренние объемы термометров герметизированы, поэтому внутреннее давление может быть только функцией измеряемой температуры. Повышение внешнего давления приводит к повышению уровня вершины столбика в капилляре. Это явление в достаточной мере заметно и подлежит учету даже при измерениях с высокими требованиями к точности. Поправка на внешнее давление является индивидуальной характеристикой каждого ЖСТ и подлежит определению на специальном стенде. Вариация барометрического давления незначительно влияет на показания стеклянных термометров.

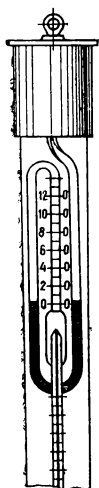
Чувствительность термометров к внешним силовым воздействиям настолько велика, что заметна разница в показаниях термометра, когда при прочих равных условиях его положение изменяется с вертикального на горизонтальное. Поправка пропорциональна высоте столбика жидкости, выраженной в градусах шкалы, $\Delta l = Kl$. Коэффициент пропорциональности для ртутных стеклянных термометров $K = 10^{-3}$. В длинных термометрах поправка достигает нескольких сотых долей градуса.

Влияние внутреннего давления сложнее влияния внешнего давления. Внутреннее давление складывается из давления паров и газов, находящихся над столбиком, давления, возникающего в результате поверхностного натяжения в мениске, и, наконец, гидростатического давления жидкости. Изменение каждой составляющей является функцией собственных аргументов. В ртутных термометрах составляющие внутреннего давления, несмотря на затруднения, можно учесть достаточно точно. В термометрах, заполненных органическими жидкостями, давление упругости паров заметно изменяется с температурой и большее количество газов растворяется в жидкости. Это нарушает увязку материального баланса газов. На практике некоторой устойчивости показаний удастся добиться устройством в верхней части капилляра небольшой ампулы.

5.5. ЖСТ специального назначения

Метастатические термометры позволяют в ходе измерений изменять пределы измеряемой температуры, сохраняя интервал. Наибольшее распространение получил термометр Бекмана, характерной особенностью которого является возможность отбора части ртути из основного сосуда. Для этого капилляр в верхней части имеет петлю и расширенный участок, куда поступает отобранная часть ртути (рис. 5.1). Изменяя количество отобранной ртути, можно варьировать положение столбика ртути в капилляре. Чем больше ртути отобрано, тем большей температуре соответствует положение вершины столбика. Условия отбора не позволяют точно определить количество отобранной ртути, поэтому абсолютные значения температур получаются с невысокой точностью, зато в пределах одного отбора изменение температуры регистрируется с большой точностью.

Термометры Бекмана широко применяются в калориметрии, где абсолютный уровень температуры не так важен, как ее изменение в процессе калориметрического измерения. Вся шкала термометра обычно соответствует изменению температуры на 5 К, которые условно обозначены цифрами 1 ... 5. Каждое деление подразделяется на 100 частей, т. е. каждому делению соответствует 0,01 К. Согласно



ГОСТ 215—57, расстояние между штрихами шкалы должно быть не менее 0,5 мм, что соответствует длине рабочей части шкалы, равной 250 мм. В ряде стран допускается снижать минимальное расстояние между штрихами до 0,25 мм, что приводит к уменьшению размеров шкалы. Термометр получается более компактным, но менее точным и удобным в отсчетах.

Для приближенной оценки уровня температуры на верхнем сосуде (петле) нанесены деления, показывающие количество отобранной ртути. Изображенная на рис. 5.1 головка соответствует термометру для измерений в диапазоне температур от 0 до 120 °С. В данном случае сравнительно компактный прибор эквивалентен термометру с длиной шкалы около 3 м.

Ртуть свойственна нелинейность зависимости плотности от температуры. Поэтому метрологические измерения высокой точности требуют учета переменности цены деления метастатических термометров при различных температурах.

Рис. 5.1. Головка термометра Бекмана.

Кроме calorиметрии, метастатические термометры применяются в термографии для точных измерений хода температуры. Рабочая шкала делится на 20 градусов, цена деления соответствует 0,05 К. Вспомогательная верхняя камера подбивается так, чтобы можно было ступеньками по 20 К измерять температуры в диапазоне, охватывающем несколько сот градусов.

В метастатических термометрах ртуть отбирается в верхнюю камеру путем нагрева основного сосуда до температуры, которая несколько превышает максимальную измеряемую. Избыток ртути автоматически оказывается в верхнем сосуде. О количестве отобранной ртути судят по делениям на вспомогательной верхней шкале. После этого термометр устанавливают таким образом, чтобы нить ртути на выходе из капилляра в верхний сосуд разорвалась, затем охлаждают термометр и производят измерения. Если необходимо вернуть часть ртути в основной сосуд, то термометр прогревают до тех пор, пока ртуть не начнет вытекать в верхний сосуд. Затем «соединяют» ртуть в одну цепь и медленно охлаждают до тех пор, пока мениск в верхнем сосуде не дойдет до требуемого уровня. После достижения требуемого уровня цепь ртути «разрывают» поворотом и встряхиванием термометра. «Соединение» и «разрыв» ртутной нити в метастатических термометрах для установления необходимого диапазона температуры измерений требуют навыка и тренировки оператора.

Рабочие характеристики серийно выпускаемого (ТУ-25-11-902-73) метастатического термометра ТЛ-1 следующие:

Рабочий интервал температур, °С	от —20 до 150
Общая длина, мм	560 ± 10
Цена деления основной шкалы, К	0,01
Цена деления вспомогательной шкалы, К	5,0

Высокотемпературные ЖСТ. В обычных ртутных термометрах, применяемых для измерения температур до 150 °С, пространство над мениском вакуумируется. С возрастанием температуры до 250 °С на-

чинается испарение ртути через мениск и конденсация ее в верхней части капилляра. Это приводит к нарушению корректности измерения из-за уменьшения рабочего количества ртути, а также к засорению верхней части капилляра пробками из сконденсировавшейся ртути. В последнем случае восстановление рабочих свойств термометра требует нагрева его до выхода столбика в верхнюю камеру. При последующем осторожном охлаждении ртуть возвращается в основной сосуд.

Свойства ртути позволяют производить измерения до более высоких пределов (критическая температура 1460°C при давлении 108,0 МПа). Чтобы пары ртути не поднимались высоко по капилляру, последний заполняют газом под высоким давлением. Заполняющий газ не должен реагировать со ртутью. В качестве такого газа используют азот, углекислый газ и аргон. Для температур ниже 350°C заполнение можно производить при атмосферном давлении. Термометры с верхним пределом до 500°C заполняют при давлении 2,5 МПа. Для температур до 750°C давление увеличивают до 10 МПа.

Заполнение ртутью таких термометров производят под вакуумом. При этом капилляр запаивается. Дальнейшее заполнение газом производят двумя методами. Первый состоит в том, что заготовки с ртутью помещают в камеру, заполняемую инертным газом под необходимым давлением. Манипулятором отбивают верхний конец капилляра, открывая тем самым доступ газу в капилляр и верхнюю камеру. После этого автомат подносит верхнюю часть капилляра к электрической печи для оплавления и герметизации. Согласно второму методу все операции производят при атмосферном давлении. В верхнюю камеру после предварительного охлаждения заливают жидкий газ, например аргон, и замораживают его. Жидкий газ должен быть в таком количестве, которое после запаивания открытого конца капилляра и нагрева обеспечит необходимое давление на мениск.

Применение галлия в качестве термометрической жидкости в корпусе из плавленного кварца позволяет производить измерения до 1200°C , не используя высокие давления. Изготовление и эксплуатация галлиевых термометров связаны с рядом затруднений. Галлий легко окисляется и в присутствии окислов начинает налипать на кварцевую поверхность, поэтому заполнение термометра металлом необходимо производить в водородной атмосфере. Чистый галлий и некоторые его сплавы склонны к значительным переохлаждениям (вплоть до 0°C) без затвердевания. Затвердевание галлия в сосуде приводит к разрушению термометра в связи с тем, что галлий, так же, как вода, обладает исключительным свойством заметного увеличения объема при переходе из жидкого состояния в твердое.

Максимальные термометры предназначены для регистрации максимальной температуры при непрерывном измерении с момента установки термометра. Они широко применяются в метеорологии, медицине, ветеринарии.

По конструктивному исполнению различают два типа. Первый основан на том, что через тонкий пережим в капилляре ртуть проходит под давлением, но под действием разрежения ртутный столбик «разрывается». Обычно пережим получают, вставляя в начальный участок капилляра тонкий стеклянный стерженец (нить). Снизу стерженец припаяется ко дну резервуара термометра. Столбик ртути «разрывается» на пережиме и остается в капилляре на уровне максимальной температуры. При повторном повышении температуры (после достижения предыдущего максимума) столбик «соединяется» и термометр регистрирует дальнейшее повышение температуры. Сбой показаний термометра осуществляется встряхиванием. Характери-

стики максимальных ртутных термометров ТБ-1Б и ТМ-1 приведены в табл. 5.6.

В капиллярный канал максимальных термометров второго типа закладывают миниатюрный ползунок, обычно удерживающийся в канале специальной пружинкой благодаря трению. При соприкосновении мениска с ползунком поверхностное натяжение (архимедова сила практически не играет роли) способствует выталкиванию ползунка из ртути. При снижении мениска ползунок остается в наивысшей точке, указывая, таким образом, максимальную температуру, измеренную термометром. Ползунок изготавливают из железа, стекла или иного материала, не поддающегося амальгамированию. Для обоих типов в качестве термометрической жидкости применяется ртуть.

Минимальные термометры предназначены для регистрации минимальной температуры при непрерывном измерении с момента установившегося термометра. Они широко применяются в метеорологии. Действие их основано на том, что мениск смачивающей жидкости все время удерживает ползунок внутри жидкости, благодаря чему ползунок стягивается мениском вниз до положения, соответствующего минимальной температуре. При возрастании температуры ползунок не оказывает сопротивления медленному перемещению столбика термометрической жидкости вверх и остается неподвижным. Приведение ползунка в соприкосновение с мениском (начальное положение) производится встряхиванием или при помощи сильного постоянного магнита. В последнем случае в ползунке должен быть предусмотрен железный сердечник. В минимальных термометрах капилляр обычно располагается горизонтально. Характеристики минимальных метеорологических термометров ТМ-2 (№ 1, 2, 3, 4) приведены в табл. 5.7.

Интересна конструкция максимально-минимального термометра Сикса, в капилляре которого над ртутным столбиком находится спиртовой столбик. Рабочей термометрической жидкостью является ртуть. Спиртовый столбик исполняет лишь передаточные функции, по его краям устанавливаются ползунки. Верхний ползунок перемещается спиртовым мениском и указывает минимальную температуру. Нижний ползунок перемещается мениском, образовавшимся на границе ртути со спиртом, и указывает максимальную температуру. В ползунки вмонтированы железные элементы, позволяющие перемещать их в исходные положения при помощи магнита. Максимальные и минимальные термометры неприменимы при наличии больших ускорений и вибраций.

Глубоководные термометры (ТГ). При измерении температуры на разных глубинах морей, озер и других водоемов необходимо зафиксировать показание термометра на некоторой заранее predetermined глубине. Наиболее удачные решения основаны на явлении разрыва столбика ртути в капилляре при опрокидывании конструкции на 180° при помощи специального устройства, срабатывающего от посыльного груза. В связи с большой инерционностью экспозиция на заданной глубине перед опрокидыванием должна быть не менее 5 мин. При опрокидывании отсчетное количество ртути, зависящее от температуры в этот момент, стекает во второй сосуд, расположенный на другом конце капилляра. Этот сосуд имеет свою шкалу, при помощи которой определяется количество отсеченной ртути, а значит, и температура в момент отсечки с точностью до $\pm 0,01$ К. Прибор позволяет измерять температуры при любых условиях, независимо от того, будет ли температура вышележащих слоев, через которые термометр неизбежно проходит при погружении или извлечении, выше или ниже измеряемой. Для случаев, когда прибор после измерения проходит через воду с температурой, большей, чем измеренная, в капилляре

предусмотрена специальная полость для слива избытка ртути, вытекающей из основного сосуда термометра.

В комплект глубоководного термометра входит вспомогательный термометр, показания которого позволяют внести коррекцию на окружающую температуру в момент отсчета. Оба термометра заключаются в прочную стеклянную или стальную оболочку. Для улучшения контакта с окружающей средой свободное пространство вокруг резервуара главного термометра заливается ртутью. В исходном положении резервуар главного термометра располагается внизу (рис. 5.2).

В СССР в зависимости от условий измерения и предъявляемых требований изготавливаются нормализованно (ВКГОКП—43.2128.0260) глубоководные термометры типа ТГ трех классов:

- I — для измерений в диапазоне от -2 до 10°C
- II — для измерений в диапазоне от -2 до 18°C
- III — для измерений в диапазоне от -2 до 30°C



Рис. 5.2. Глубоководный термометр.

I классу соответствует цена деления $0,05\text{ K}$, II и III — $0,1\text{ K}$. Вспомогательный термометр градуируется в пределах от -20 до 45°C с ценой деления $0,5\text{ K}$. Размеры ТГ: диаметр — 20 мм , длина — 320 мм . Шкала и оцифровка главного термометра для удобства отсчета в перевернутом положении наносятся в обратном порядке.

Комбинируя два термометра, один из которых защищен от воздействия гидростатического давления воды, а второй свободно подвержен давлению, определяют разность их показаний, по которой с достаточной точностью можно судить о глубине измерения температуры. Зависимость между разностью температур двух термометров определяется градуировкой в лабораторных условиях. Обычно каждому градусу этой разности соответствует изменение глубины на $80\ldots 140\text{ м}$. Ошибка в определении глубины таким методом не превышает 10 м . Существуют термометры для измерения температуры на глубине свыше 8000 м ; в этом случае разность температур может достигать до 100 K . Серийно выпускаемые термометры-глубиномеры типа ТГМ (ВКГОКП—43.2128.0290) по всем показателям соответствуют трем классам описанных выше термометров типа ТГ.

5.6. Серийные ЖСТ, выпускаемые промышленностью

Общие технические характеристики ЖСТ, выпускаемых промышленностью СССР, приведены в табл. 5.4—5.8. В зависимости от формы нижней части ГОСТ 2823—73 предусматривает следующие исполнения: прямые (П) и угловые (У). В случае, если угол между нижней и верхней частями не равен 90° , в таблицах против буквы условного обозначения показан угол между верхней и нижней частями, например У135. Отсутствие цифры при обозначении углового исполнения означает поворот нижней части на 90° .

По конструктивному оформлению шкалы различают (ГОСТ 9177—74 и ГОСТ 215—73) следующие типы ЖСТ:

- А — палочки из массивных капиллярных трубок, на внешней поверхности которых нанесена шкала
- Б — с вложенной шкальной пластиной, заключенной внутри стеклянной оболочки термометра
- В — с наружной шкальной пластиной, на которой закрепляется стеклянная конструкция ЖСТ

Для обозначения термометрической жидкости в таблицах приняты следующие обозначения первыми двумя буквами: Рт — ртуть, ПЭ — петролейный эфир, Пн — пентан, То — толуол, Кр — керосин, СЭ — спирт этиловый, СА — специальная амальгама. Третья буква обозначает наличие окраски в органической термометрической жидкости: О — окрашенная, Н — неокрашенная.

В зависимости от условий эксплуатации ЖСТ изготавливаются в следующих исполнениях: полного погружения, частичного погруже-

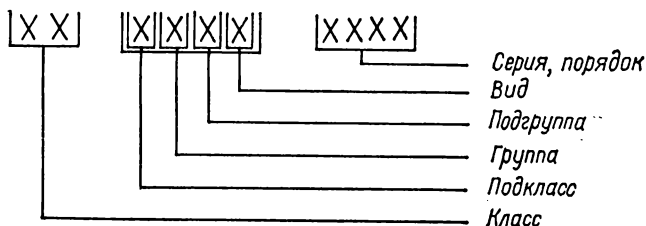


Рис. 5.3. Схема кода ВКГОКП.

ния. В таблицах мера погружения отмечается буквенно или цифрами, обозначающими глубину погружения в миллиметрах. Буквенные отметки имеют следующие значения: п — полное погружение всего термометра, нч — погружение только нижней части, ото — погружение до отсчитываемой температурной отметки, пОо — погружение до нулевой отметки.

Графа ВКГОКП — высшая классификационная группировка общесоюзного классификатора промышленной и сельскохозяйственной продукции — предназначена для единообразия обозначений при использовании современных средств вычислительной техники в общегосударственной системе учета, планирования и снабжения. Структурная схема кода ВКГОКП приведена на рис. 5.3.

В промышленности СССР приняты нормированные типоразмеры изделий. При использовании таблицами в сокращениях нормированных длин нижних частей приняты следующие обозначения:

- 50...300 соответствует ряду 50, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 300 мм с производным сокращенным рядом 80...300 мм
- 60...400 соответствует ряду 60, 80, 100, 120, 160, 200, 250, 400 мм с производным сокращенным рядом 120...400
- 66...1003 соответствует ряду 66, 103, 163, 253, 403, 633, 1003 мм с производным сокращенным рядом 103...403
- 104...1041 соответствует ряду 104, 141, 201, 291, 441, 671, 1041 мм с производным сокращенным рядом 104...291
- 80...1000 соответствует ряду 80, 100, 120, 160, 200, 250, 320, 400, 500, 630, 800, 1000 мм с производным сокращенным рядом, 80...500 мм

Т а б л и ц а 5.4. Лабораторные термометры

Обозначение термометра	Номер	Диапазон измеряемых температур, °С		Цена деления, К	Термометрическая жидкость	Исполнение	Конструкция
		от	до				
ТЛ-2	1	—30	70	1,0	Рт	П	Б
	2	0	100	1,0	Рт	П	Б
	3	0	150	1,0	Рт	П	Б
	4	0	250	1,0	Рт	П	Б
	5	0	360	1,0	Рт	П	Б
ТЛ-3	1	0	450	2,0	Рт	П	А
	2	0	500	2,0	Рт	П	А
	3	0	600	2,0	Рт	П	А
ТЛ-4	1	—30	20	0,1	Рт	П	Б
	2	0	55	0,1	Рт	П	Б
	3	50	105	0,1	Рт	П	Б
	4	100	155	0,1	Рт	П	Б
	5	150	205	0,1	Рт	П	Б
	6	200	255	0,1	Рт	П	Б
	7	250	305	0,1	Рт	П	Б
	8	300	355	0,1	Рт	П	Б
ТЛ-5	1	—30	70	0,5	Рт	П	Б
	2	0	105	0,5	Рт	П	Б
	3	100	205	0,5	Рт	П	Б
	4	200	300	0,5	Рт	П	Б
ТЛ-6	1	—30	25	0,5	Рт	П	Б
	2	0	55	0,5	Рт	П	Б
	3	50	105	0,5	Рт	П	Б
	4	100	155	0,5	Рт	П	Б
	5	150	205	0,5	Рт	П	Б
	6	200	255	0,5	Рт	П	Б
	7	250	305	0,5	Рт	П	Б
	8	300	360	0,5	Рт	П	Б
ТЛ-7	1	—5	100	0,5	Рт	П	Б
	2	0	105	0,5	Рт	П	Б
ТЛ-7А	1	—10	65	0,2	Рт	П	Б
	2	0	75	0,2	Рт	П	Б
ТЛ-10	—	95	115	0,5	Рт	П	Б
	—	или 100	120				
ТЛ-15	—	—100	20	1,0	ПЭН	П	Б
ТЛ-16	—	—5	35	0,5	Рт	П	А
	—	0	40				
ТЛ-18	—	8	38	0,1	Рт	П	Б
ТЛ-19	—	10	35	0,1	Рт	П	Б
ТЛ-20	—	35	60	0,1	Рт	П	Б
ТЛ-21	—	55	100	0,1	Рт	П	Б
	—	60	100				
	—	85	130	0,1	Рт	П	Б
ТЛ-22	—	90	130				
	—						

Длина, мм			ГОСТ, ТУ	ВКГОКП	Примечание
общая	верхней части	погружаемой части			
250 ± 20	—	ото	215—73	43.2121.0110	
250 ± 20	—	ото	215—73	43.2121.0110	
280 ± 20	—	ото	215—73	43.2121.0110	
320 ± 20	—	ото	215—73	43.2121.0110	
360 ± 20	—	ото	215—73	43.2121.0110	
400	—	ото	215—73	43.2121.0010	
450	—	ото	215—73	43.2121.0010	
600	—	ото	215—73	43.2121.0010	
530 ± 30	—	ото	215—73	43.2121.0210	
530 ± 30	—	ото	215—73	43.2121.0210	
530 ± 30	—	ото	215—73	43.2121.0210	
530 ± 30	—	ото	215—73	43.2121.0210	
530 ± 30	—	ото	215—73	43.2121.0210	
530 ± 30	—	ото	215—73	43.2121.0210	
530 ± 30	—	ото	215—73	43.2121.0210	
530 ± 30	—	ото	215—73	43.2121.0210	
320 ± 20	—	ото	215—73	43.2121.0140	
320 ± 20	—	ото	215—73	43.2121.0140	
320 ± 20	—	ото	215—73	43.2121.0140	
160 ± 10	—	ото	215—73	43.2121.0160	
160 ± 10	—	ото	215—73	43.2121.0160	
160 ± 10	—	ото	215—73	43.2121.0160	
160 ± 10	—	ото	215—73	43.2121.0160	
160 ± 10	—	ото	215—73	43.2121.0160	
160 ± 10	—	ото	215—73	43.2121.0160	
160 ± 10	—	ото	215—73	43.2121.0160	
645 ± 40	—	нч	5-1305—72	43.2121.0220	Для измерения в бактериологических термостатах
645 ± 40	—	нч	5-1305—72	43.2121.0220	
645 ± 40	—	нч	5-1305—72	43.2121.0220	
645 ± 40	—	нч	5-1305—72	43.2121.0220	
85 ± 5	—	ото	2045—71	43.2121.0251	Для испытания нитро-клетчатки
400 ± 40	—	ото	9177—74	43.2121.0254	
200 ± 10	—	90	5-2157—74	43.2121.0260	Для нормального элемента II класса
255 ± 10	—	нч	2045—71	43.2121.0291	
235 ± 15	—	ото	2045—71	43.2121.0301	
235 ± 15	—	ото	2045—71	43.2121.0304	
290 ± 10	—	ото	2045—71	43.2121.0312	Для бензола
290 ± 10	—	ото	2045—71	43.2121.0313	Для толуола

Обозначение термометра	Номер	Диапазон измере- мых температур, °C		Цена деления, К	Термо- метриче- ская жидкость	Испол- нение	Конст- рук- ция
		от	до				
ТЛ-23	—	100	150	0,1	Рт	П	Б
ТЛ-28	—	110	150	0,1	Рт	П	Б
		125	160				
ТЛ-42	1	—7	13	0,5	Рт	П	Б
	2	20	40	0,1	Рт	П	Б
	3	34	54	0,1	Рт	П	Б
	4	56	76	0,1	Рт	П	Б
	5	66	86	0,1	Рт	П	Б
	6	74	94	0,1	Рт	П	Б
	7	100	120	0,1	Рт	П	Б
	8	115	135	0,1	Рт	П	Б
	9	122	142	0,1	Рт	П	Б
	10	151	171	0,1	Рт	П	Б
	11	184	204	0,1	Рт	П	Б
	12	235	275	0,2	Рт	П	Б
	13	31	71	0,2	Рт	П	Б
ТЛ-50	1	—5	30	0,1	Рт	П	Б
	2	30	65	0,1	Рт	П	Б
	3	65	100	0,1	Рт	П	Б
	4	—30	140	0,2	Рт	П	Б
	5	40	110	0,2	Рт	П	Б
	6	110	180	0,2	Рт	П	Б
	7	180	200	0,2	Рт	П	Б
	9	0	100	0,5	Рт	П	Б
	10	0	150	0,5	Рт	П	Б
	11	100	200	0,5	Рт	П	Б
	12	100	250	0,5	Рт	П	Б
	13	200	300	0,5	Рт	П	Б
	16	0	200	1,0	Рт	П	Б
ТР-1	17	0	250	1,0	Рт	П	Б
	18	0	360	1,0	Рт	П	Б
	19	0	400	2,0	Рт	П	Б
	1	0	4	0,01	Рт	П	А
	2	4	8	0,01	Рт	П	А
	3	8	12	0,01	Рт	П	А
	4	12	16	0,01	Рт	П	А
	5	16	20	0,01	Рт	П	А
	6	20	24	0,01	Рт	П	А
	7	24	28	0,01	Рт	П	А
	8	28	32	0,01	Рт	П	А
	9	32	36	0,01	Рт	П	А
	10	36	40	0,01	Рт	П	А
	11	40	44	0,01	Рт	П	А
	12	44	48	0,01	Рт	П	А
	13	48	52	0,01	Рт	П	А
	14	52	56	0,01	Рт	П	А
	15	56	60	0,01	Рт	П	А

Продолжение табл. 5.4

Длина, мм			ГОСТ, ТУ	ВКГОКП	Примечание
общая	верхней части	погружаемой части			
290 ± 10	—	ото	2045—71	43.2121.0315	Для ксилола
290 ± 10	—	ото	2045—71	43.2121.0317	Для изопропилбензола
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	Выпускаются комплектами и отдельно
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	
270 ± 10	—	130	2045—71	43.2121.0500	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	Снабжены конусными взаимозаменяемыми шлифами КШ 14/23 по ГОСТ 8682—70
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
—	260 ± 10	80—300	16590—71	43.2121.2000	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	Образцовый
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	
500 ± 20	—	п	5-1851—73	43.2121.1100	

Обозначение термометра	Номер	Диапазон измеряемых температур, °С		Цена деления, К	Термометрическая жидкость	Исполнение	Конструкция
		от	до				
ТР-III	1	140	160	0,05	Рт	П	А
	2	160	180	0,05	Рт	П	А
	3	180	200	0,05	Рт	П	А
	4	200	220	0,05	Рт	П	А
	5	220	240	0,05	Рт	П	А
	6	240	260	0,05	Рт	П	А
	7	260	280	0,05	Рт	П	А
	8	280	300	0,05	Рт	П	А
ТР-IV	1	300	350	0,1	Рт	П	А
	2	350	400	0,1	Рт	П	А
	3	400	450	0,1	Рт	П	А
	4	450	500	0,1	Рт	П	А
ТР-V	—			0,02	Рт	П	А
ТР-II	1	55	65	0,02	Рт	П	А
	2	65	75	0,02	Рт	П	А
	3	75	85	0,02	Рт	П	А
	4	85	95	0,02	Рт	П	А
	5	95	105	0,02	Рт	П	А
	6	105	115	0,02	Рт	П	А
	7	115	125	0,02	Рт	П	А
	8	125	135	0,02	Рт	П	А
	9	135	145	0,02	Рт	П	А
	10	145	155	0,02	Рт	П	А
ТКР	—	0	4	1,0	Рт	П	А
ТКРУ	—	0	3	0,67	Рт	П	А
ТН	—	—200	30	1,0	Пн	П	Б

Общий вид типичных лабораторных ЖСТ представлен на рис. 5.4 (тип А) и рис. 5.5 (тип Б). Применительно к специфическим условиям лабораторного оборудования изготавливаются специальные термометры, например для бактериологических термостатов (ТЛ-7 и ТЛ-7А), для нормального элемента II класса (ТЛ-16) и т.п. К этой же категории можно отнести лабораторные ЖСТ с конусными взаимозаменяемыми шлифами (ТЛ-50), представленные на рис. 5.6. Они предназначены для измерения температуры в лабораторных узкогорлых сосудах и аппаратах, снабженных конусными шлифами, с которыми взаимозаменяемо сопрягаются конусные шлифы термометров.

Для точных измерений температур и их разностей изготавливается достаточно широкая серия ЖСТ, в которых расстояние между штрихами по всей шкале одинаково. Они обозначаются ТР (термометр равноделенный) и предназначены для использования в качестве образцового. При образцовых измерениях переход от делений равноделенной шкалы к температуре производится по таблицам, составляемым индивидуально для каждого термометра в процессе его аттестации.

Продолжение табл. 5.4

Длина, мм			ГОСТ, ТУ	ВКГОКП	Примечание
общая	верхней части	погружаемой части			
500	—	п	5-1851—73	43.2121.1600	Образцовый
500	—	п	5-1851—73	43.2121.1600	
500	—	п	5-1851—73	43.2121.1600	
500	—	п	5-1851—73	43.2121.1600	
500	—	п	5-1851—73	43.2121.1600	
500	—	п	5-1851—73	43.2121.1600	
500	—	п	5-1851—73	43.2121.1600	
500	—	п	5-1851—73	43.2121.1600	Образцовый
500	—	п	5-1851—73	43.2121.1700	
500	—	п	5-1851—73	43.2121.1700	
500	—	п	5-1851—73	43.2121.1700	
400	—	ото	5-1851—73	43.2121.1801	Повышенной точности
540	—	п	5-1851—73	43.2121.1400	
540	—	п	5-1851—73	43.2121.1400	Образцовый
540	—	п	5-1851—73	43.2121.1400	
540	—	п	5-1851—73	43.2121.1400	
540	—	п	5-1851—73	43.2121.1400	
540	—	п	5-1851—73	43.2121.1400	
540	—	п	5-1851—73	43.2121.1400	
540	—	п	5-1851—73	43.2121.1400	
540	—	п	5-1851—73	43.2121.1400	
540	—	п	5-1851—73	43.2121.1400	
540	—	п	5-1851—73	43.2121.1400	
520±50	—	нч	25-11-666—77	43.2121.1804	Калориметрический
620±50	—	нч	25-11-666—77	43.2121.1805	
—	—	—	—	43.2121.0090	

Промышленные термометры (табл. 5.5) отличаются от лабораторных большей приспособленностью к условиям промышленных установок и аппаратуры, для измерения температуры в которых они предназначены (вулканизаторный, аккумуляторный, авиационный и т.п.), большей простотой исполнения, неприхотливостью и дешевизной. Виброустойчивые варианты выпускаются в металлической оправе на специальных прокладках. Они должны выдерживать вибрацию с ускорением до 1,5 g при частоте в диапазоне от 10 до 60 Гц. Большинство технических ЖСТ в прямом исполнении имеют угловые аналоги. Типичные технические термометры в прямом и угловом исполнении представлены на рис. 5.7 и 5.8.

Специальные термометры (табл. 5.6) характеризуются еще более узкой, чем лабораторные и промышленные, приспособленностью к специфическим условиям установок и аппаратуры сравнительно редкого применения, а следовательно, меньшей универсальностью. Некоторые из них предназначены для измерений в специальных установках, где наблюдение за показанием производится через зеркало. Для удобства

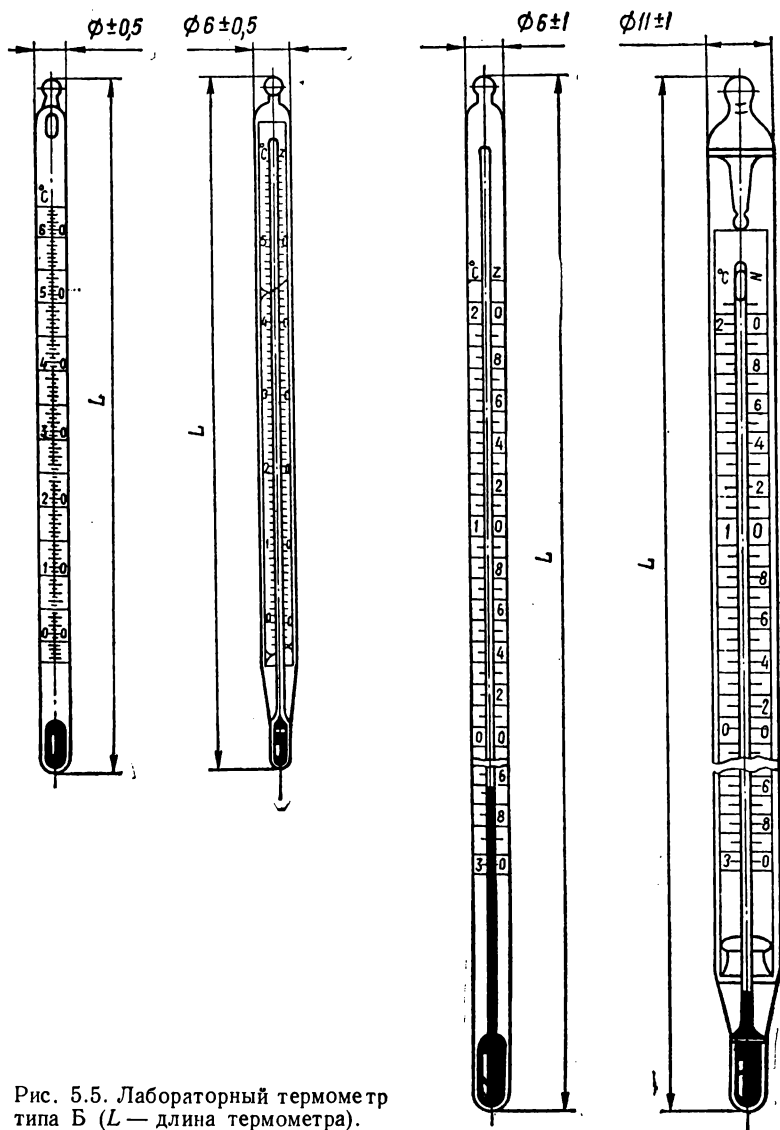


Рис. 5.5. Лабораторный термометр типа Б (L — длина термометра).

отсчета оцифровка и видимые надписи на шкале выполнены в зеркальном отображении.

Бытовые, сельскохозяйственные и метеорологические ЖСТ (табл. 5.7) имеют единственный объединяющий признак — сравнительную малочисленность типов изделий каждого направления и неудобство полиграфического оформления маломерных индивидуальных таблиц.

Термоконтакты (табл. 5.8) представляют собой ЖСТ с впаянными в капилляр электрическими контактами, замыкание цепи в которых происходит в зависимости от положения мениска металлической термометрической жидкости. Благодаря такой особенности термоконтакты позволяют получать прямую дискретную информацию о температурном состоянии резервуара ЖСТ в виде системы электрических сигналов. Поскольку в термоконтактах необходимо вставлять контактный провод в капилляр или впаивать в него контакты, диаметр ка-

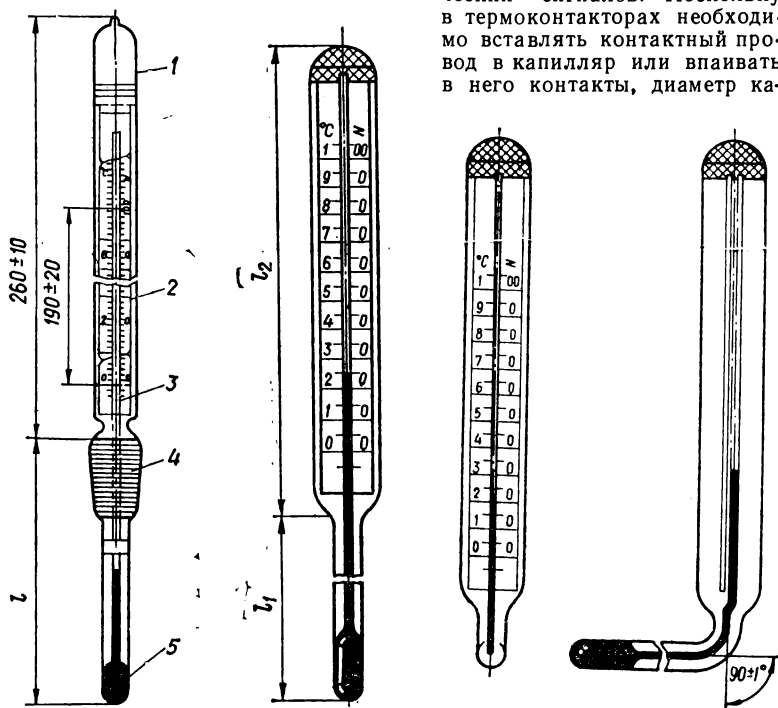


Рис. 5.6. ЖСТ с взаимозаменяемыми шлифами:

1 — оболочка; 2 — шкала; 3 — капилляр; 4 — шлифы; 5 — резервуар; l — установочный размер.

Рис. 5.7. Технический термометр в прямом исполнении:

l_1 , l_2 — длины соответственно нижней и верхней частей.

Рис. 5.8. Технический термометр в угловом исполнении.

пилляра, а следовательно, и размер резервуара приходится выбирать заметно большими, чем у обычных измерительных ЖСТ.

Термоконтакты используют в системах сигнализации, контроля и автоматизации по температурному параметру. Так же, как и обычные ЖСТ, термоконтакты выпускают в прямом и угловом исполнении. По конструкции их разделяют на устройства с подвижным контактом (ТПК, рис. 5.9) и заданными постоянными контактами (ТЗК (рис. 5.10) и ТК 1). Во всех конструкциях общий соединительный контакт выполняют из платиновой проволоки диаметром 0,1 мм и впаивают

Т а б л и ц а 5.5. Промышленные термометры

Обозначение термометра	Номер	Диапазон измеряемых температур, °С		Цена деления, К	Термометрическая жидкость	Исполнение	Конструкция
		от	до				
ТП-1	—	100	350	5,0	Рт	У	Б
ТП-3	—	100	250	1,0	Рт	П	Б
ТП-4	—	—5	75	0,5	Рт	П	Б
ТП-6	—	—55	55	1,0	То0	П	Б
ТП-7	—	20	150	1,0	Рт	П	Б
ТП-9	—	0	100	2,0	То0	У	
ТП-9	—	0	100	2,0	То0	У	
ТП-10	—	0	100	5,0	То0	П	Б
ТП-11	—	—35	50	1,0	То0	П	Б
ТП-14	1	0	150	2,0	Кр0	П	А
	2	0	150	2,0	Кр0	П	А
	3	0	150	2,0	Кр0	П	А
	4	0	150	2,0	Кр0	П	А
	5	0	150	2,0	Кр0	У	А
	6	0	150	2,0	Кр0	У	А
ТП-17	1	100	650	5,0	Рт	П	А
	2	100	650	5,0	Рт	П	А
	1	100	650	5,0	Рт	У	А
	2	100	650	5,0	Рт	У	А
ТП-21	1	0	100	1,0	Рт	П	В
	2	0	150	2,0	Рт	П	В
	3	0	200	2,0	Рт	П	В
	4	0	300	5,0	Рт	П	В
	5	0	400	5,0	Рт	П	В
ТП-22	—	—30	35	0,5	Рт	П	Б
ТП-23	1	0	500	10,0	Рт	П	В
	2	0	600	10,0	Рт	П	В

Длина, мм				ГОСТ, ТУ	ВКГОКП	Примечание
общая	верхней части	нижней части	погружаемой части			
—	175 ± 10	975 ± 50	нч	25-11-904—73	43.2122.0001	Для хлебопечения
185 ± 10	—	—	нч	2045—71	43.2122.0004	Вулканизаторный
280 ± 15	—	—	нч	2045—71	43.2122.0007	Аккумуляторный
255 ± 15	—	—	п	9177—74	43.2122.0010	Авиационный
215 ± 10	—	—	п	25-11-562—70	43.2122.0013	Дезкамерный
—	115 ± 5	65 ± 5	нч	9177—74	43.2122.0016	максимальный
—	115 ± 5	30 ± 5	нч	9177—74	43.2122.0016	Для кипятильников
115 ± 10	—	—	нч	9177—74	43.2122.0020	«Титан»
185 ± 5	185 ± 5	—	ото	9177—74	43.2122.0023	Для маслосепараторов
235 ± 5	—	115 ± 3	65	25-11-530—76	43.2122.0040	Для рефрижераторов
270 ± 5	—	150 ± 3	100	25-11-530—76	43.2122.0040	Для судовых
320 ± 5	—	200 ± 3	150	25-11-530—76	43.2122.0040	двигателей
470 ± 5	—	350 ± 3	300	25-11-530—76	43.2122.0040	
—	120	185 ± 3	150	25-11-530—76	43.2122.0040	
—	120	285 ± 3	250	25-11-530—76	43.2122.0040	
410 ± 6	—	250 ± 3	200	25-11-531—70	43.2122.0070	Для выхлопных
485 ± 6	—	325 ± 3	275	25-11-531—70	43.2122.0070	газов судовых
—	160	235 ± 3	200	25-11-531—70	43.2122.0070	двигателей
—	160	310 ± 3	275	25-11-531—70	43.2122.0070	
—	210	60—400	нч	25-11-859—73	43.2122.0200	Виброустойчивые
—	210	60—400	нч	25-11-859—73	43.2122.0200	
—	210	60—400	нч	25-11-859—73	43.2122.0200	
—	210	60—400	нч	25-11-859—73	43.2122.0200	
200	210	120—400	нч	25-11-859—73	43.2122.0200	
—	—	—	ото	—	43.2122.0131	Для спирта
—	215	80—400	нч	25-11-838—77	43.2122.0300	Виброустойчивый
—	215	80—400	нч	25-11-838—77	43.2122.0300	

Обозначение термометра	Номер	Диапазон измеряемых температур, °С		Цена деления, К	Термометрическая жидкость	Исполнение	Конструкция
		от	до				
ТП-25	—	50	250	1,0	Рт	П	Б
	—	20	220	1,0	Рт	П	Б
П	1	—90	30	1,0	СА	П	Б
П	2	—30	50	0,5	Рт	П	Б
	2	—30	50	1,0	Рт	П	Б
П	3	—60	50	1,0	Рт	П	Б
	3	—60	50	1,0	Рт	П	Б
П	4	0	100	1,0	Рт	П	Б
	4	0	100	1,0	Рт	П	Б
П	5	0	160	1,0	Рт	П	Б
	5	0	160	2,0	Рт	П	Б
П	6	0	200	1,0		П	Б
	6	0	200	2,0		П	Б
П	7	0	300	2,0	Рт	П	Б
П	8	0	350	5,0	Рт	П	Б
П	9	0	400	5,0	Рт	П	Б
П	10	0	450	5,0	Рт	П	Б
П	11	0	500	5,0	Рт	П	Б
П	12	0	600	5,0	Рт	П	Б
	12	0	600	10,0	Рт	П	Б
У	2	—30	50	0,5	Рт	У	Б
	2	—30	50	1,0	Рт	У	Б
У	3	—60	50	1,0	Рт	У	Б
	3	—60	50	1,0	Рт	У	Б
У	4	0	100	1,0	Рт	У	Б
	4	0	100	1,0	Рт	У	Б
У	5	0	160	1,0	Рт	У	Б
	5	0	160	2,0	Рт	У	Б
У	6	0	200	1,0	Рт	У	Б
	6	0	200	2,0	Рт	У	Б
У	7	0	300	5,0	Рт	У	Б
У	8	0	350	5,0	Рт	У	Б
У	9	0	400	5,0	Рт	У	Б
У	10	0	450	5,0	Рт	У	Б
У	11	0	500	5,0	Рт	У	Б
У	12	0	600	5,0	Рт	У	Б
	12	0	600	10,0	Рт	У	Б
ТВ	—	20	150	1,0	Кр0	У135	Б
ТД	—	20	100	1,0	Кр0	У135	Б
ТР	—	20	150	1,0	Кр0	П	Б

Продолжение табл. 5.5

Длина, мм				ГОСТ, ТУ	ВКГОКП	Примечание
общая	верхней части	нижней части	погружаемой части			
215 ± 10	—	—	п		43.2122.0140	Максимальный
215 ± 10	—	—	п		43.2122.0140	
—	240	66...1003	нч	2823—73	43.2122.1000	
—	240	66...1003	нч	2823—73	43.2122.1001	
—	160	66...1003	нч	2823—73	43.2122.1001	
—	240	66...1003	нч	2823—73	43.2122.1002	
—	240	66...1003	нч	2823—73	43.2122.1002	
—	240	66...1003	нч	2823—77	43.2122.1041	
—	160	66...1003	нч	2823—77	43.2122.1041	
—	240	66...1003	нч	2823—77	43.2122.1071	
—	160	66...1003	нч	2823—77	43.2122.1071	
—	240	66...1003	нч	2823—77	43.2122.1111	
—	160	66...1003	нч	2823—77	43.2122.1111	
—	240	66...1003	нч	2823—77	43.2122.1151	
—	240	66...1003	нч	2823—77	43.2122.1171	
—	240	103...403	нч	2823—77	43.2122.1191	
—	240	103...403	нч	2823—77	43.2122.1201	
—	240	103...403	нч	2823—77	43.2122.1211	
—	240	103...403	нч	2823—77	43.2122.1212	
—	240	103...403	нч	2823—77	43.2122.1212	
—	240	104...1041	нч	2823—73	43.2122.1241	
—	160	104...1041	нч	2823—73	43.2122.1241	
—	240	104...1041	нч	2823—77	43.2122.1243	
—	160	104...1041	нч	2823—77	43.2122.1243	
—	240	104...1041	нч	2823—77	43.2122.1281	
—	160	104...1041	нч	2823—77	43.2122.1281	
—	240	104...1041	нч	2823—77	43.2122.1311	
—	160	104...1041	нч	2823—77	43.2122.1311	
—	240	104...1041	нч	2823—77	43.2122.1351	
—	160	104...1041	нч	2823—77	43.2122.1351	
—	240	104...1041	нч	2823—77	43.2122.1393	
—	240	104...1041	нч	2823—77	43.2122.1411	
—	240	104...291	нч	2823—77	43.2122.1431	
—	240	104...291	нч	2823—77	43.2122.1441	
—	240	104...291	нч	2823—77	43.2122.1451	
—	240	104...291	нч	2823—77	43.2122.1461	
—	240	104...291	нч	2823—77	43.2122.1461	
—	300 ± 10	—	нч	25-11-849—78	43.2122.0033	Выпарной сахарный
—	300 ± 10	290 ± 10	нч	25-11-852—73	43.2122.0031	
538	—	—	нч	25-11-850—73	43.2122.0032	Решоферный сахарный

Т а б л и ц а 5.6. Специальные термометры

Обозначение термометра	Номер	Диапазон измеряемых температур, °C		Цена деления, К	Термометрическая жидкость	Исполнение	Конструкция
		от	до				
СП-4	—	0	50	1,0	To0	П	В
СП-5	—	—30	10	1,0	To0	П	В
СП-6	—	—20	40	1,0	To0	П	В
СП-7	—	—30	30	1,0	To0	П	Б
СП-8	—	—5	45	0,5	Pт	П	Б
СП-10	—	100	360	5,0	Pт	П	Б
СП-11	—	20	60	1,0	Pт	У135	Б
СП-12	—	0	70	1,0	To0	У	Б
СП-13	—	—31	60	0,5	Pт	П	А
СП-14	1	—20	—5	0,2	Pт	У	А
	2	—10	5	0,2	Pт	У	А
	3	0	15	0,2	Pт	У	А
	4	10	25	0,2	Pт	У	А
	5	20	35	0,2	Pт	У	А
	6	30	45	0,2	Pт	У	А
СП-17	2	—5	25	1,0	Pт	П	Б
СП-18	3	20	45	1,0	Pт	П	Б
СП-19	—	0	250	5,0	Pт	У	Б
СП-20	—	—45	35	1,0	To0	П	Б
СП-21	—	—33	51	0,5	Pт	П	А
СП-22М	1	—20	—10	0,2	Pт	У	Б
	2	—15	—5	0,2	Pт	У	Б
	3	—10	0	0,2	Pт	У	Б
	4	—5	5	0,2	Pт	У	Б
	5	0	10	0,2	Pт	У	Б
	6	5	15	0,2	Pт	У	Б
	7	10	20	0,2	Pт	У	Б
	8	15	25	0,2	Pт	У	Б
	9	20	30	0,2	Pт	У	Б
	10	25	35	0,2	Pт	У	Б
	11	30	40	0,2	Pт	У	Б
	12	40	50	0,2	Pт	У	Б
СП-23	1	15	60	0,2	Pт	У	А
	2	25	35	0,1	Pт	У	А
	3	30	40	0,1	Pт	У	А
	4	35	45	0,1	Pт	У	А
	5	40	50	0,1	Pт	У	А

Длина, мм			ГОСТ, ТУ	ВКГОКП	Примечание
общая	верхней части	погружаемой части			
108 ± 1	—	п	25-11-653—76	43.2126.0010	Для кондиционера
108 ± 1	—	п	25-11-653—76	43.2126.0012	То же
102 ± 1	—	п	25-11-868—73	43.2126.0014	Для кабины самолета
280	—	нч	25-11-840—73	43.2126.0015	Для измерений в мясе
175 ± 15	—	ото	25-11-403—60 2045—71	43.2126.0018	Для газоанализатора
235	—	нч	25-11-514—70	43.2126.0021	К аппарату
—	—	нч	2045—71	43.2126.0024	ВТИ-2
—	160 ± 10	115 ± 5	9177—74	43.2126.0025	Для специальных камер
205 ± 20	—	п	2045—71	43.2126.0027	Отсчетный
—	75	217 ± 5	2045—71	43.2126.0030	»
—	75	217 ± 5	2045—71	43.2126.0030	
—	75	217 ± 5	2045—71	43.2126.0030	
—	75	217 ± 5	2045—71	43.2126.0030	
—	75	217 ± 5	2045—71	43.2126.0030	
—	75	217 ± 5	2045—71	43.2126.0030	
80 ± 10	—	п	2045—71	43.2126.0060	Обратный
80 ± 10	—	п	2045—71	43.2126.0062	»
—	110	115 ± 15	2045—71	43.2126.0081	
275 ± 15	—	нч	9177—74	43.2126.0084	Для замораживающей колонки
190 ± 20	—	п	2045—71	43.2126.0085	Отсчетный
—	70	190 ± 5	2045—71	43.2126.0201	Для гравиметров
—	70	190 ± 5	2045—71	43.2126.0201	
—	70	190 ± 5	2045—71	43.2126.0201	
—	70	190 ± 5	2045—71	43.2126.0201	
—	70	190 ± 5	2045—71	43.2126.0201	
—	70	190 ± 5	2045—71	43.2126.0201	
—	70	190 ± 5	2045—71	43.2126.0201	
—	70	190 ± 5	2045—71	43.2126.0201	
—	70	190 ± 5	2045—71	43.2126.0201	
—	70	190 ± 5	2045—71	43.2126.0201	
—	70	190 ± 5	2045—71	43.2126.0201	
—	70	190 ± 5	2045—71	43.2126.0201	
—	125 ± 5	285 ± 10	2045—71	43.2126.0120	Отсчетный
—	90 ± 5	285 ± 10	2045—71	43.2126.0120	для гравиметров
—	90 ± 5	285 ± 10	2045—71	43.2126.0120	
—	90 ± 5	285 ± 10	2045—71	43.2126.0120	
—	90 ± 5	285 ± 10	2045—71	43.2126.0120	

Обозначение термометра	Номер	Диапазон измеряемых температур, °С		Цена деления, К	Термометрическая жидкость	Исполнение	Конструкция
		от	до				
СП-24	—	20	50	0,5	Рт	П	А
СП-25	—	10	40	0,2	Рт	П	Б
СП-26	—	10	40	0,5	Рт	П	А
СП-28	1	130	170	0,5	Рт	П	А
СП-29	2	0	50	0,5	Рт	П	А
СП-30	3	150	200	1,0	Рт	П	А
СП-31	4	50	150	1,0	Рт	П	А
СП-32	5	80	120	0,5	Рт	П	А
СП-33	6	40	80	0,5	Рт	П	А
СП-34	7	30	70	0,5	Рт	П	А
СП-35	—	200	300	1,0	Рт	У75	Б
СП-36	—	0	150	2,0	Рт	У105	Б
СП-40	1	—30	0	0,5	Рт	У	А
	2	—5	25	0,5	Рт	У	А
	3	15	45	0,5	Рт	У	А
СП-41	—	0	33	1,0	То0	П	А
СП-41А	—	10	30	1,0	То0	У	А
СП-41В	—	9	33	0,5	То0	П	
СП-50	—	0	50	0,5	Кр0	П	
СП-59	—	5	25	1,0	Рт	У	Б
СП-64	—	0	60	0,5	Рт	П	Б
СП-2А	—	0	100	1,0	Кр0	П	Б
СП-2А	—	0	200	2,0	Кр0	П	Б
СП-2Б	—	0	100	1,0	Кр0	У	Б
СП-2Б	—	0	200	2,0	Кр0	У	Б

в нижнюю часть капилляра. В ТПК исполнительный контакт выполняют из вольфрамовой проволоки диаметром не более 0,1 мм, закрепленной сверху на перемещаемой микрометрическим винтом гайке. Нижний конец вольфрамовой проволоки вставлен в капилляр и должен перемещаться в нем свободно во всем диапазоне регулирования температуры. Вращением микрометрического винта можно варьировать положение места соприкосновения контакта с мениском термометрической жидкости — ртути. Вращение винта производится посредством герметической магнитной муфты. Пространство над мениском ртути для увеличения срока службы заполнено сухим водородом под давлением не менее 65 кПа для термоконтакторов с переменным контактом и под давлением не менее 80 кПа — для приборов с заданными точками контактирования.

На шкальной пластине ТПК наносят две шкалы. Оцифровка и деления нижней шкалы соответствуют положению ртутного мениска при температуре резервуара. Верхняя шкала имеет адекватную нижней оцифровку, и деления ее предназначены для установки указателя на

Продолжение табл. 5.6

Длина, мм			ГОСТ, ТУ	ВКГОКП	Примечание
общая	верхней части	погружаемой части			
155 ± 10	—	п	2045—71	43.2126.0301	Для газо-анализатора
180	—	ото	2045—71	43.2126.0304	
110 ± 5	—	п	2045—71	43.2126.0307	
185 ± 5	—	35	25-11-556—70	43.2126.0310	
					Для установок ЦИАМ-9
180 ± 5	—	35	25-11-1192—75	43.2126.0312	То же
192 ± 5	—	25	25-11-1192—75	43.2126.0313	»
360 ± 5	—	125	25-11-1192—75	43.2126.0314	»
185 ± 5	—	35	25-11-1192—75	43.2126.0315	»
185 ± 5	—	35	25-11-1192—75	43.2126.0316	»
200 ± 5	—	50	25-11-1192—75	43.2126.0317	»
—	300	150	2045—71	43.2126.0341	Для авто-клавов Отсчетный
—	185 ± 10	145 ± 15	2045—71	43.2126.0342	
—	60	198	25-11-635—76	43.2126.0350	
—	60	198	25-11-635—76	43.2126.0350	
—	60	198	25-11-635—76	43.2126.0350	К аппарату наркоза
120 ± 5	—	—	25-11-558—76	43.2126.0380	
—	65	140 ± 3	25-11-558—76	43.2126.0380	
120 ± 5	—	—	25-11-558—76	43.2126.0380	
—	230 ± 10	60 ± 10	25-11-549—76	43.2126.0393	Для электролитов
—	200 ± 15	100 ± 10	25-11-901—73	43.2126.0395	
—	220	66, 103, 120	2045—71	43.2126.0397	
—	220	60...400	25-11-663—76	43.2126.1000	
—	220	60...400	25-11-663—76	43.2126.1000	
—	220	110...450	25-11-663—76	43.2126.1000	
—	220	110...450	25-11-663—76	43.2126.1000	
—	220	110...450	25-11-663—76	43.2126.1000	

гайке ползуна в положение, соответствующее температуре контактирования.

Допускаемая погрешность термометров типа ТПК и погрешность установки точки контактирования не превышают цены деления установочной шкалы.

В термометрах с заданной температурой контактирования в местах капилляра, соответствующих положению мениска при заданной температуре, вплавляются платиновые контакты, аналогичные нижнему соединительному. На соединительный и заданные платиновые контакты для удобства обращения и исключения потерь напаяется стеклянная пуговичка, после которой производится контактный неразъемный паянный переход на провод из меди диаметром менее 0,3 мм.

Значения заданных температур контактирования обозначены специальными отметками на шкале. Количество заданных точек контактирования у изделий, выпускаемых серийно, может доходить до трех. Большое количество точек контактирования выполняется в порядке

Таблица 5.7. Бытовые, сельскохозяйственные, метеорологические

Обозначение термометра	Номер	Диапазон измеряемых температур, °С		Цена деления, К	Термометрическая жидкость	Исполнение	Конструкция	Дли	
		от	до					общая	
ТН-1	1	0	170	1,0	Рт	П	Б	250 ± 10	
	2	130	300	1,0	Рт	П	Б	250 ± 10	
ТН-2	—	0	360	1,0	Рт	П	Б	330 ± 10	
ТН-3	1	0	60	0,5	Рт	П	Б	250 ± 10	
ТН-4	2	50	110	0,5	Рт	П	Б	250 ± 10	
	1	0	150	1,0	Рт	П	Б	250 ± 10	
	2	100	250	1,0	Рт	П	Б	250 ± 10	
ТН-5	—	30	100	0,2	Рт	П	Б	300 ± 10	
ТН-6	—	—30	60	1,0	Рт	П	Б	300 ± 20	
ТН-7	—	0	360	1,0	Рт	П	Б	350 ± 10	
ТН-8	—	—80	60	1,0	То0	П	Б	350 ± 10	
ТБ-1Б	—	32—35	42	0,1	Рт	П	Б	125 ± 10	
ТБ-2М	1	0	35	1,0	То0	П	В	—	
	2	0	40	1,0	То0	П	В	—	
ТБН-4	—	—50	50	1,0	То0	П	Б	228 ± 10	
ТБ-38	—	—50	50	1,0	То0	П	Б	228 ± 10	
ТБ-45	—	—50	50	1,0	То0	П	Б	345	
ТС-2	—	0	50	1,0	То0	П	Б	150 ± 15	
ТС-3	—	—5	50	1,0	То0	П	Б	185 ± 20	
ТС-4	—	0	100	1,0	То0	П	Б	270 ± 25	
ТС-5	—	—10	35	0,5	То0	П	Б	1405 ± 15	
ТС-6	—	0	60	1,0	То0	П	Б	460 ± 40	
ТС-7	—	—10	60	1,0	То0	П	Б	225	
ТС-8	—	—20	70	1,0	То0	П	Б	190 ± 5	
ТС-9	—	—10	40	0,5	То0	П	Б	320 ± 10	
ТС-11	—	25	40	0,2	Рт	У	Б	—	
ТС-12	—	30	40	1,0	Рт	П	В	335	
ТМ-1	1	—35	50	0,5	Рт	П	Б	340 ± 20	
	2	—20	70	0,5	Рт	П	Б	340 ± 20	
ТМ-2	1	—75	21	0,5	СЭН	П	Б	340 ± 20	
	2	—61	31	0,5	СЭН	П	Б	340 ± 20	
	3	—51	31	0,5	СЭН	П	Б	340 ± 20	
	4	—41	41	0,5	СЭН	П	Б	340 ± 20	
ТМ-3	1	—10	85	0,5	Рт	П	Б	360 ± 10	
	2	—25	70	0,5	Рт	П	Б	360 ± 10	
	3	—35	60	0,5	Рт	П	Б	360 ± 10	

термометры

на, мм		ГОСТ, TV	ВКГОКП	Примечание
верхней части	погружаемой части			
—	55	400—80E	43.2123.0010	Применяются в приборе Мартенс—Пенского
—	55	400—80E	43.2123.0010	
—	45	400—80E	43.2123.0041	Применяется в приборе Бренкена
—	90	400—80E	43.2123.0050	При определении вязкости
—	90	400—80E	43.2123.0050	Для определения температуры
—	п	400—80E	43.2123.0080	каплепадения
—	п	400—80E	43.2123.0080	Для парафина
—	65	400—80E	43.2123.0121	Для определения температуры застывания
—	160	400—80E	43.2123.0124	Для разгонки нефтепродуктов
—	п	400—80E	43.2123.0127	Для разгонки нефтепродуктов
—	160	2045—71	43.2123.0131	Низкоградусный
—	—	400—80E	43.2124.0001	Медицинский максимальный
—	—	302—79E	43.2124.0001	Комнатный
—	пп	—	43.2124.0011	Уличный
—	п	—	43.2124.0011	
—	п	25-11-1043—75	43.2124.0505	
—	п	25-11-1043—75	43.2124.0505	
—	п	25-11-999—75	43.2124.0507	
—	ото	9177—74	43.2125.0001	Для искусственного осеменения
—	ото	25-11-810—72	43.2125.0004	Для яровизации посевного зерна
—	поо	25-11-838—77	43.2125.0005	Для молока и молочных продуктов
—	нч	25-11-867—73	43.2125.0009	Для сахарной свеклы в буртах
—	нч	9177—74	43.2125.0010	Для протравки семян
—	п	25-11-853—77	43.2125.0015	Для складских помещений
—	п	25-11-811—72	43.2125.0018	Для зерна в хранилищах
—	п	25-11-924—74	43.2125.0020	Для буртов овощей
150	нч	25-11-854—77	43.2125.0021	Инкубаторный
—	п	25-11-855—77	43.2125.0022	»
—	п	112—78E	43.2128.0010	Метеорологический
—	п	112—78E	43.2128.0010	максимальный
—	п	112—78E	43.2128.0040	Метеорологический
—	п	112—78E	43.2128.0040	минимальный
—	п	112—78E	43.2128.0040	Для поверхности почвы (срочный)
—	нч	112—78E	43.2128.0070	
—	нч	112—78E	43.2128.0070	
—	нч	112—78E	43.2128.0070	

Обозначение термометра	Номер	Диапазон измеряемых температур, °С		Цена деления, К	Термометрическая жидкость	Исполнение	Конструкция	Дли
		от	до					общая
ТМ-4	1	—35	40	0,2	Рт	П	Б	410±10
	2	—25	50	0,2	Рт	П	Б	410±10
ТМ-5	1	—10	50	0,5	Рт	У135	Б	290
	2	—10	50	0,5	Рт	У135	Б	350
	3	—10	50	0,5	Рт	У135	Б	450
	4	—10	50	0,5	Рт	У135	Б	500
ТМ-6	1	—30	50	0,2	Рт	П	Б	270±0,5
	2	—25	50	0,2	Рт	П	Б	270±0,5
ТМ-8	1	—30	50	0,5	Рт	П	А	190±20
	2	—35	40	0,5	Рт	П	А	190±20
ТМ-9	1	—75	25	0,5	СЭН	П	Б	410±20
	2	—65	25	0,5	СЭН	П	Б	410±20
ТМ-10	1	—10	40	0,2	Рт	П	Б	360±10
	2	—10	40	0,2	Рт	П	Б	360±10
	3	—5	40	0,2	Рт	П	Б	360±10
ТМ-11	—	—5	45	1,0	Рт	П	Б	165±5
ТМ-13	—	0	40	1,0	Рт	Термозаготовка к баро		
ТМ-14	—	—3	65	0,5	Рт	П	Б	—
СП-27	1	—15	51	1,0	Рт	П	Б	135±10
	2	—25	40	1,0	Рт	П	Б	135±10

Таблица 5.8. Электроконтактные термометры, термоконтакты

Обозначение термометра	Номер	Диапазон измеряемых температур, °С		Цена деления, К	Рабочие точки контактирования, °С	Допустимые отклонения	Исполнение	Конструкция
		от	до					
ТПК	1—П	0	50	1,0	—	—	П	Б
	2—П	50	100	1,0	—	—	П	Б
	3—П	—30	70	2,0	—	—	П	Б
	4—П	0	100	2,0	—	—	П	Б
	5—П	50	150	2,0	—	—	П	Б
	6—П	100	200	2,0	—	—	П	Б
	7—П	150	250	2,0	—	—	П	Б
	8—П	200	300	2,0	—	—	П	Б
	1—У	0	50	1,0	—	—	У	Б
	2—У	50	100	1,0	—	—	У	Б
	3—У	—30	70	2,0	—	—	У	Б
	4—У	0	100	2,0	—	—	У	Б
	5—У	50	150	2,0	—	—	У	Б
	6—У	100	200	2,0	—	—	У	Б

Продолжение табл. 5.7

на, мм		ГОСТ, ТУ	ВКГОКП	Примечание
верхней части	погружаемой части			
—	нч	112—78Е	43.2128.0110	Метеорологический
—	нч	112—78Е	43.2128.0110	Психрометрический
215±15	50	112—78Е	43.2128.0124	Коленчатый Савинова
215±15	100	112—78Е	43.2128.0124	
215±15	150	112—78Е	43.2128.0124	
215±15	200	112—78Е	43.2128.0124	
—	—	112—78Е	43.2128.0130	Метеорологический к
—	—	112—78Е	43.2128.0130	аспирационному
—	—	112—78Е	43.2128.0150	психрометру
—	—	112—78Е	43.2128.0150	Метеорологический
—	—	112—78Е	43.2128.0180	пращевой
—	—	112—78Е	43.2128.0180	Низкоградусный
—	—	112—78Е	43.2128.0220	Метеорологический
—	—	112—78Е	43.2128.0220	почвенно-глубинный
—	—	112—78Е	43.2128.0220	Для воды
—	—	2045—71	43.2128.0251	К ртутным барометрам
метру	анероиду	112—78		Гидрогеологический
—	ото	25-11-1207—76	43.2128.0252	
—	ото	2045—71	43.2128.0254	
—	ото	25-11-1416—78	43.2126.0257	
—	ото	25-11-1416—78	43.2126.0257	

Длина, мм			ГОСТ, ТУ	ВКГОКП	Примечание
общая	верхней части	нижней части			
—	330±10	80...500	9871—75Е	43.2127.1100	Термометры
—	330±10	80...500	9871—75Е	43.2127.1100	с перемен-
—	330±10	80...500	9871—75Е	43.2127.1100	ным кон-
—	330±10	80...500	9871—75Е	43.2127.1100	тактом и
—	330±10	80...500	9871—75Е	43.2127.1100	магнитной
—	330±10	80...500	9871—75Е	43.2127.1100	регулиру-
—	330±10	80...500	9871—75Е	43.2127.1100	емой
—	330±10	80...500	9871—75Е	43.2127.1100	
—	330±10	130...450	9871—75Е	43.2127.1100	
—	330±10	130...450	9871—75Е	43.2127.1100	
—	330±10	130...450	9871—75Е	43.2127.1100	
—	330±10	130...450	9871—75Е	43.2127.1100	
—	330±10	130...450	9871—75Е	43.2127.1100	
—	330±10	130...450	9871—75Е	43.2127.1100	
—	330±10	130...450	9871—75Е	43.2127.1100	

Обозначение термометра	Номер	Диапазон измеряемых температур, °С		Цена деления, К	Рабочие точки кон- тактирования, °С	Допустимые отклонения	Исполнение	Конструкция
		от	до					
ТЗК	7—У	150	250	2,0	—	—	У	Б
	8—У	200	300	2,0	—	—	У	Б
	1	0	50	1,0	—	—	П	Б
	2	0	100	2,0	—	—	П	Б
	3	0	200	2,0	—	—	П	Б
	4	0	300	2,0	—	—	П	Б
	1	0	50	1,0	—	—	У	Б
	2	0	100	2,0	—	—	У	Б
	3	0	200	2,0	—	—	У	Б
	4	0	300	2,0	—	—	У	Б
ТК-5Д	—	—	—	—	105, 130, 160	—	П	Б
ТЗК-5В	—	80	150	1,0	105, 130	±1	П	Б
ТК-1	1	—5	70	—	—	—	П	А
	2	—5	70	—	—	—	П	А
	3	—5	70	—	—	—	П	А
	4	—5	70	—	—	—	П	А
	5	0	100	—	—	—	П	А
	6	0	100	—	—	—	П	А
	7	0	100	—	—	—	П	А
	8	0	100	—	—	—	П	А
	9	0	100	—	—	—	П	А
	10	0	100	—	—	—	П	А
ТК-2	11	100	200	—	—	—	П	А
	12	100	300	—	—	—	П	А
	1	—5	70	—	—	—	У	А
	2	—5	70	—	—	—	У	А
	3	—5	70	—	—	—	У	А
	4	—5	70	—	—	—	У	А
	5	—5	70	—	—	—	У	А
	6	0	100	—	—	—	У	А
	7	0	100	—	—	—	У	А
	8	0	100	—	—	—	У	А
ТК-3	9	0	100	—	—	—	У	А
	10	0	100	—	—	—	У	А
	11	100	150	—	—	—	У	А
	12	100	150	—	—	—	У	А
	13	100	200	—	—	—	У	А
	14	100	300	—	—	—	У	А
	1	0	100	—	—	—	П	А
	2	0	100	—	—	—	П	А
	3	0	100	—	—	—	П	А
	4	0	100	—	—	—	П	А
	5	0	100	—	—	—	П	А
	6	0	100	—	—	—	П	А
	7	0	100	—	—	—	П	А
	8	100	150	—	—	—	П	А
	9	100	150	—	—	—	П	А

Продолжение табл. 5.8

Длина, мм			ГОСТ, ТУ	ВКГОКП	Примечание
общая	верхней части	нижней части			
—	330 ± 10	130...450	9871—75Е	43.2127.1100	Количество точек кон-тактирования может быть равно 1, 2 или 3 с интервалами в 0,1 диапазона измерения
—	330 ± 10	130...450	9871—75Е	43.2127.1100	
—	200 ± 10	80...1000	9871—75Е	43.2127.2100	
—	200 ± 10	80...1000	9371—75Е	43.2127.2100	
—	200 ± 10	80...1000	9871—75Е	43.2127.2100	
—	200 ± 10	80...1000	9871—75Е	43.2127.2100	
—	200 ± 10	130...1050	9871—75Е	43.2127.2100	
—	200 ± 10	130...1050	9871—75Е	43.2127.2100	
—	200 ± 10	130...1050	9871—75Е	43.2127.2100	
—	200 ± 10	130...1050	9871—75Е	43.2127.2100	
—	125	90	—	43.2127.2100	
—	115 ± 5	95 ± 5	25-11-1178—75	43.2127.2100	
50	—	—	19855—74Е	43.2127.5100	
60	—	—	19855—74Е	43.2127.5100	
70	—	—	19855—74Е	43.2127.5100	
80	—	—	19855—74Е	43.2127.5100	
90	—	—	19855—74Е	43.2127.5100	
100	—	—	19855—74Е	43.2127.5100	
120	—	—	19855—74Е	43.2127.5100	
150	—	—	19855—74Е	43.2127.5100	
200	—	—	19855—74Е	43.2127.5100	
300	—	—	19855—74Е	43.2127.5100	
215	—	—	19855—74Е	43.2127.5100	
310	—	—	19855—74Е	43.2127.5100	
	50	50...300	19855—74Е	43.2127.5100	
	60	50...300	19855—74Е	43.2127.5100	
	70	50...300	19855—74Е	43.2127.5100	
	80	50...300	19855—74Е	43.2127.5100	
	90	50...300	19855—74Е	43.2127.5100	
	100	50...300	19855—74Е	43.2127.5100	
	120	50...300	19855—74Е	43.2127.5100	
	150	50...300	19855—74Е	43.2127.5100	
	200	50...300	19855—74Е	44.2127.5100	
	300	50...300	19855—74Е	43.2127.5100	
	150	50...300	19855—74Е	43.2127.5100	
	210	50...300	19855—74Е	43.2127.5100	
	230	50...300	19855—74Е	43.2127.5100	
	300	50...300	19855—74Е	43.2127.5100	
90	—	—	19855—74	43.2127.5100	
100	—	—	19855—74	43.2127.5100	
120	—	—	19855—74	43.2127.5100	
150	—	—	19855—74	43.2127.5100	
200	—	—	19855—74	43.2127.5100	
240	—	—	19855—74	43.2127.5100	
300	—	—	19855—74	43.2127.5100	
150	—	—	19855—74	43.2127.5100	
175	—	—	19855—74	43.2127.5100	

Обозначение термометра	Номер	Диапазон измеряемых температур, °С		Цена деления, К	Рабочие точки кон- тактирования, °С	Допустимые отклонения	Исполнение	Конструкция
		от	до					
TK-4	10	100	150	—	—	—	П	А
	11	150	200	—	—	—	П	А
	12	200	300	—	—	—	П	А
	1	0	100	—	—	—	У	А
	2	0	100	—	—	—	У	А
	3	0	100	—	—	—	У	А
	4	0	100	—	—	—	У	А
	5	0	100	—	—	—	У	А
	6	0	100	—	—	—	У	А
	7	0	100	—	—	—	У	А
	8	100	150	—	—	—	У	А
	9	100	150	—	—	—	У	А
TK-7	10	150	200	—	—	—	У	А
	11	150	200	—	—	—	У	А
	12	200	300	—	—	—	У	А
	—	—	—	—	—	—	У	А
TK-8	—	—	—	—	205	±5	П	А
TK-11	1	—	—	—	80	±2	П	А
	2	—	—	—	43	±0,2	У	А
TK-11A	1	—	—	—	45	±0,2	У	А
	2	—	—	—	23,5	±0,2	П	А
	3	—	—	—	25	±0,2	П	А
	4	—	—	—	33,5	±0,2	П	А
TK-12	—	—	—	—	35	±0,2	П	А
	—	—	—	—	37,5	—	П	А
TK-15	—	—	—	—	60	—	П	А
TK-16	—	—	—	—	50	—	П	А
TK-20	—	—	—	—	69	—	П	А
TK-17	—	—	—	—	27, 30, 34	±1	П	А
TK-30	1	—	—	—	42	±1	П	А
	2	—	—	—	45	±1	П	А
TK-34	1	—	—	—	12...20	±0,5	П	А
	2	—	—	—	10...15	±0,5	П	А
	3	—	—	—	23...25	±0,5	П	А
	4	—	—	—	33...38	±0,5	П	А
	5	—	—	—	45...55	±0,5	П	А
TK-40A	—	—	—	—	30...40	±0,08	П	А
TK-49	—	—	—	—	16...70	±0,5	П	А
TK-52A	1	—	—	—	7	—	П	А
	2	—	—	—	8	—	П	А
	3	—	—	—	10	—	П	А
	4	—	—	—	16...34 или 35...50	—	П	А
	5	—	—	—	70	—	П	А
	6	—	—	—	80	—	П	А

Продолжение табл. 5.8

Длина, мм			ГОСТ, ТУ	ВКГОКП	Примечание
общая	верхней части	нижней части			
210	—	—	19855—74	43.2127.5100	Для инку- баторов Виброударо- стойкие
250	—	—	19855—74	43.2127.5100	
290	—	—	19855—74	43.2127.5100	
—	90	—	19855—74	43.2127.5100	
—	100	—	19855—74	43.2127.5100	
—	120	—	19855—74	43.2127.5100	
—	150	50...300	19855—74	43.2127.5100	
—	200	—	19855—74	43.2127.5100	
—	240	—	19855—74	43.2127.5100	
—	300	—	19855—74	43.2127.5100	
—	160	50...300	19855—74	43.2127.5100	
—	200	—	19855—74	43.2127.5100	
—	220	—	19855—74	43.2127.5100	
—	260	50...300	19855—74	43.2127.5100	
—	300	—	19855—74	43.2127.5100	
240 ± 5	—	—	25-11-1198—75	43.2127.5100	
50 ± 3	—	—	25-11-502—70	43.2127.5100	
—	65	—	25-11-1099—75	43.2127.5100	
—	65	—	25-11-1099—75	43.2127.5100	
—	100	—	25-11-1099—75	43.2127.5100	
—	100	—	25-11-1099—75	43.2127.5100	
—	100	—	25-11-1099—75	43.2127.5100	
—	100	—	25-11-1099—75	43.2127.5100	
245	—	—	25-11-1064—75	43.2127.5100	
65	—	—	25-11-1183—75	43.2127.5100	
58	—	—	25-11-1183—75	43.2127.5100	
58	—	—	25-11-1183—75	43.2127.5100	
85 ± 5	—	—	25-11-1391—77	43.2127.5100	
95 ± 3	—	—	25-11-470—70	43.2127.5100	
95 ± 3	—	—	25-11-470—70	48.2127.5100	
100 ± 5	—	—	25-11-1120—75	43.2127.5100	
100 ± 5	—	—	25-11-1120—75	43.2127.5100	
100 ± 5	—	—	25-11-1120—75	43.2127.5100	
100 ± 5	—	—	25-11-1120—75	43.2127.5100	
100 ± 5	—	—	25-11-1120—75	43.2127.5100	
160 ± 10	—	—	25-11-533—70	43.2127.5100	
125	—	—	1224—71	—	
—	—	—	25-11-663—71	43.2127.5100	
120	—	—	25-11-1053—75	43.2127.5100	
120	—	—	25-11-1053—75	43.2127.5100	
120	—	—	25-11-1053—75	43.2127.5100	
120	—	—	25-11-1053—75	43.2127.5100	
120	—	—	25-11-1053—75	43.2127.5100	
120	—	—	25-11-1053—75	43.2127.5100	
120	—	—	25-11-1053—75	43.2127.5100	

Обозначение термометра	Номер	Диапазон измеряемых температур, °С		Цена деления, К	Рабочие точки контактирования, °С	Допустимые отклонения	Исполнение	Конструкция
		от	до					
ТК-53БМ ТК-53ММ ТК-54	7	—	—	—	100	—	П	А
	8	—	—	—	90	—	П	А
	9	—	—	—	5	—	П	А
		—35	100	—	—	—	П	А
		—35	100	—	—	—	П	А
	1	19,5	62,5	—	19,5; 20,5	$\pm 0,2$	П	А
	2	19,5	62,5	—	21,5; 22,5	$\pm 0,2$	П	А
	3	19,5	62,5	—	23,5; 24,5	$\pm 0,2$	П	А
	4	19,5	62,5	—	25,5; 26,5	$\pm 0,2$	П	А
	5	19,5	62,5	—	27,5; 28,5	$\pm 0,2$	П	А
	6	19,0	62,5	—	29,5; 30,5	$\pm 0,2$	П	А
	7	19,5	62,5	—	31,5; 32,5	$\pm 0,2$	П	А
	8	19,5	62,5	—	33,5; 34,5	$\pm 0,2$	П	А
	9	19,5	62,5	—	34,5; 35,5	$\pm 0,2$	П	А
	10	19,5	62,5	—	35,5; 36,5	$\pm 0,2$	П	А
	11	19,5	62,5	—	37,5; 38,5	$\pm 0,2$	П	А
	12	19,5	62,5	—	39,5; 40,5	$\pm 0,2$	П	А
	13	19,5	62,5	—	44,5; 45,5	$\pm 0,2$	П	А
	14	19,5	62,5	—	49,5; 50,5	$\pm 0,2$	П	А
	15	19,5	62,5	—	54,5; 55,5	$\pm 0,2$	П	А
	16	19,5	62,5	—	57,5; 58,5	$\pm 0,2$	П	А
	17	19,5	62,5	—	59,5; 60,5	$\pm 0,2$	П	А
	18	19,5	62,5	—	61,5; 62,5	$\pm 0,2$	П	А
	19	19,5	62,5	—	18 —	$\pm 0,2$	П	А
ТК-56 ТК-57	20	19,5	62,5	—	20 —	$\pm 0,2$	П	А
					21 —	$\pm 0,2$	П	А
					22 —	$\pm 0,2$	П	А
					25 —	$\pm 0,2$	П	А
					28 —	$\pm 0,2$	П	А
					30 —	$\pm 0,2$	П	А
					45; 55	$\pm 0,2$	П	А
					40; 45; 55	$\pm 0,2$	П	А

исключения по специальному заказу. При необходимости большого количества точек контактирования проще обойтись увеличением числа используемых термоконтакторов. Интервал между соседними точками контактирования не менее 10 % диапазона, охватываемого шкалой.

Термоконтакторы могут работать в цепях постоянного и переменного тока промышленной частоты. Для работы в цепях постоянного тока контакты имеют маркировку полярности (+ или —). Соединительный нижний контакт должен быть подключен к «минусу». Требования к электрической цепи, в которой работает термоконтактор, обусловлены главным образом исключением возможностей образования в контактах искр и дуги. Для этого мощность коммутации термокон-

Продолжение табл. 5.8

Длина, мм			ГОСТ, ТУ	ВКГОКП	Примечание
общая	верхней части	нижней части			
120	—	—	25-11-1053—75	43.2127.5100	Повышенной точности
120	—	—	25-11-1053—75	43.2127.5100	
120	—	—	25-11-1053—75	43.2127.5100	
250	—	—	25-11-1190—75	43.2127.5100	
170	—	—	25-11-1190—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
205 ± 5	—	—	25-11-1187—75	43.2127.5100	
130 ± 5	—	—	25-11-1202—75	43.2127.5100	
65 ± 5	—	—	25-11-1202—75	43.2127.5100	

такторов не должна превышать 1 Вт при силе тока не более 40 мА и максимальном номинальном напряжении не более 220 В. При соблюдении таких условий все выпускаемые промышленностью термоконтакты обеспечивают не менее 10^6 замыканий и размыканий с вероятностью не менее 88 %. При снижении рабочего тока до 0,5 мА число циклов превышает 10^6 . Для термоконтакторов палочного типа серии ТК при тех же условиях эксплуатации и гарантии число замыканий и размыканий составляет половину указанных.

Повышение точности контактирования, как, например, в ТК-53, достигается за счет заметного увеличения объема резервуара: в малой модели (ММ) длина резервуара 60 мм при диаметре 6 мм; в большой модели (БМ) длина резервуара 100 мм при диаметре 9 мм. Качество

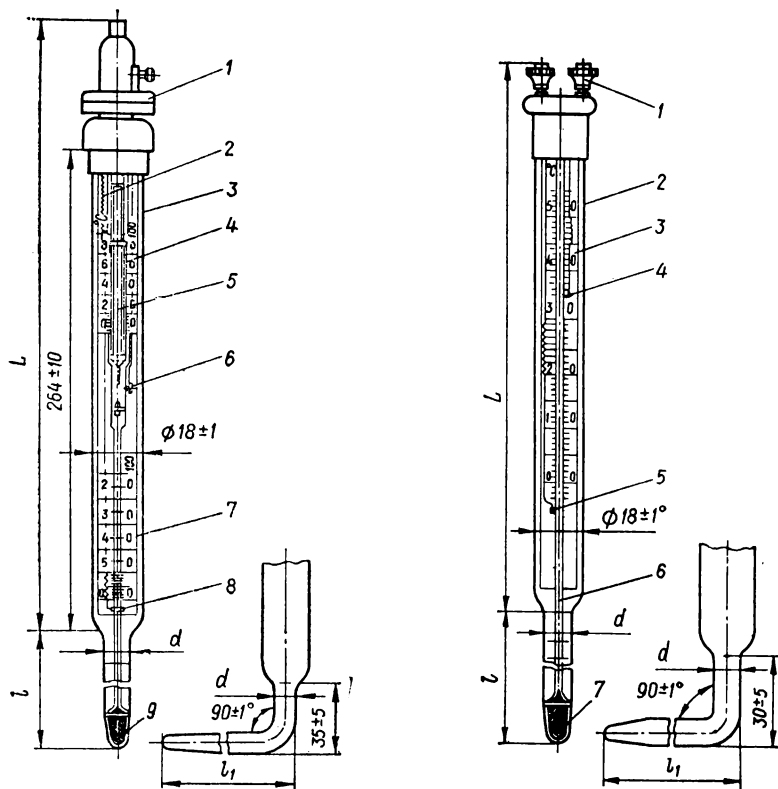


Рис. 5.9. Термоконтактор с подвижным контактом:

1 — постоянный магнит; 2 — медный провод; 3 — оболочка; 4 — верхняя шкала; 5 — микровинт; 6 — подвижный контакт; 7 — нижняя шкала; 8 — неподвижный контакт; 9 — резервуар; l — длина нижней части; L — длина верхней части; l_1 — длина изогнутой части; d — диаметр нижней части.

Рис. 5.10. Термоконтактор с заданным контактом:

1 — зажим; 2 — оболочка; 3 — шкала; 4, 5 — контакты; 6 — капилляр; 7 — резервуар; l — длина нижней части; L — длина верхней части; l_1 — длина изогнутой части; d — диаметр нижней части.

исполнения определяется сортом. При изготовлении в первом сорте ТК-55БМ имеет чувствительность, равную 0,01 К.

Корректность регулирования температуры зависит не только от точности чувствительного элемента — термоконтактора, но и от правильности решений комплексных тепло- и электротехнических задач.

6.1. Принцип действия, классификация и устройство

Принцип действия измерителей температуры, называемых манометрическими термометрами, основан на использовании однозначной зависимости между температурой и давлением термометрического вещества, находящегося в герметично замкнутой манометрической термосистеме. Манометрическая термосистема состоит из термобаллона, соединительной трубки (дистанционного капилляра) и упругого чувствительного элемента, которые совместно образуют герметический объем, занятый наполнителем — термометрическим (рабочим) веществом.

В зависимости от рода рабочего вещества и его агрегатного (фазового) состояния манометрические термометры подразделяют на три класса: газовые (Г), жидкостные (Ж) и конденсационные или парожидкостные (К).

Манометрические термометры выпускают в различных вариантах исполнения: в виде показывающих, самопишущих приборов без или со встроенными устройствами сигнализации или регулирования температуры. Общие требования, которым должны удовлетворять манометрические термометры, определены ГОСТ 8624—80.

Схема конструктивного оформления показывающего манометрического термометра приведена на рис. 6.1, а. Манометрическая термосистема термометра состоит из термобаллона, капилляра и манометрической пружины. Температура термобаллона, погруженного в исследуемую среду, функционально преобразуется в давление рабочего вещества манометрической системы. Соединительный капилляр передает изменение давления на манометрическую пружину. Держатель соединяет внутреннюю полость закрепленного конца пружины с капилляром. Свободный герметизированный конец пружины шарнирно связан поводком с зубчатым сектором, который находится в зацеплении с трибкой. На оси трибки насажена стрелка — указатель. Зазор в передаточном механизме выбирается спиральной пружинкой.

Термобаллон имеет цилиндрическую форму; его диаметр и длина зависят от рода термометрического вещества и диапазона измеряемых температур. Термобаллон обычно выполняют из стали 1Х18Н9Т.

Капилляры манометрических термометров изготавливают из латуни и стали с наружным диаметром 2,5 и внутренним 0,35 мм. В соответствии с ГОСТ 8624—80 длина капилляра дискретно нормирована и может принимать следующие значения: 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4,0; 6,0; 10,0; 12,0; 16,0; 25,0; 40,0 и 60 м. Капилляр может быть защищен от возможных механических повреждений оболочкой из оцинкованной стальной ленты или полиэтилена высокого давления. В термометрах тропического исполнения капилляр защищен оболочкой из нержавеющей стальной ленты марки Х18Н10Т-М.

Манометрическая пружина имеет сечение овальной формы (рис. 6.1, *е*) или в виде восьмерки (рис. 6.1, *в*). Профиль сечения пружины последнего вида обладает рядом преимуществ.

Термометрическая система заполняется рабочим веществом под некоторым начальным давлением, разным для газовых, жидкостных и конденсационных термометров. Термобаллон конденсационных термометров заполнен рабочей жидкостью на 0,7—0,75 его объема (см. рис. 6.1, *б*). Верхнюю часть баллона заполняют насыщенные пары этой жидкости. Капилляр конденсационных термометров вставлен на такую глубину, чтобы его открытый конец был всегда погружен в конденсат.

При изменении температуры термобаллона изменяется давление внутри манометрической системы, происходит деформация (раскрутка или закрутка) пружины. Свободное перемещение конца пружины с помощью передаточного механизма (звеньев 5—7) преобразуется во вращение стрелки — указателя относительно отметок оцифрованной в градусах Цельсия шкалы. Вариация температуры среды, в которой находится пружина, т.е. отклонение температуры пружины от ее нормального значения 20 °С, компенсируется с помощью термобиметаллического компенсатора (см. рис. 6.1, *а*).

В самопишущих манометрических термометрах (рис. 6.2) давление в термосистеме, однозначно связанное с температурой термобаллона и передаваемое капилляром, преобразуется в деформацию спиральной пружины.

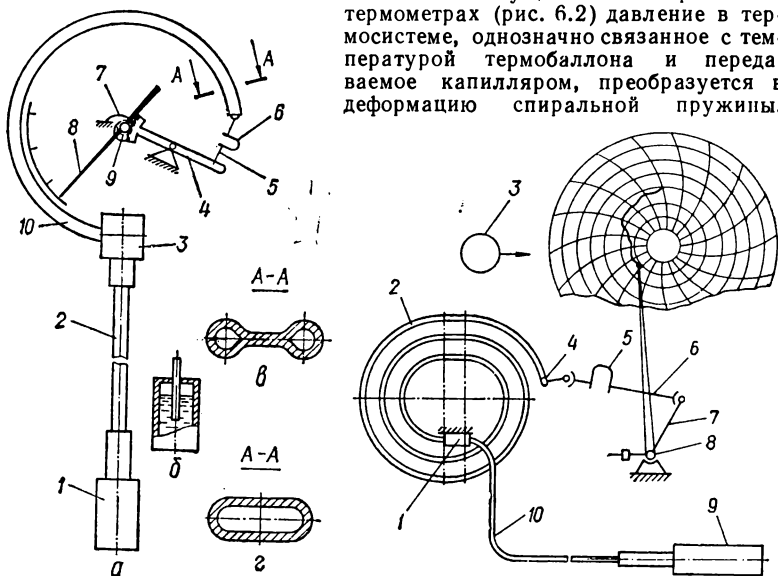


Рис. 6.1. Схема устройства показывающего манометрического термометра:

а — термосистема; *б* — термобаллон; *в*, *г* — профили сечения пружины; *1* — термобаллон; *2* — капилляр; *3* — держатель; *4* — сектор; *5* — поводок; *6* — компенсатор; *7* — спиральный волосок; *8* — указательная стрелка; *9* — трибка; *10* — манометрическая пружина.

Рис. 6.2. Схема устройства самопишущего термометра:

1 — держатель; *2* — спиральная манометрическая пружина; *3* — двигатель; *4* — скоба; *5* — компенсатор; *6* — поводок; *7* — рычаг; *8* — ось рычага; *9* — термобаллон; *10* — капилляр.

Один конец пружины закреплен в держателе, а свободный конец шарнирно связан посредством скобы, поводка, термобиметаллического компенсатора с рычагом, который жестко соединен с поворотным рычагом. Перо для записи показаний расположено на конце рычага. Запись показаний производится на дисковой бумажной диаграмме, которая приводится во вращение (чаще со скоростью одного оборота в сутки) с помощью часового механизма или электрического синхронного микродвигателя. Имеются модификации манометрических термометров, записывающие показания от двух отдельных термосистем.

Более подробные сведения об устройстве, работе, монтаже и проверке манометрических термометров приведены в соответствующих технических инструкциях.

6.2. Температурные диапазоны работы манометрических термометров

Манометрические термометры применяются для измерения, записи и регулирования температуры газов, паров и жидкостей в диапазоне от -150 до 1000°C . Термометры выпускаются с классами точности 1,0; 1,5; 2,5 при заполнении термосистемы газами или жидкостями и с классами точности 1,5; 2,5; 4,0 при заполнении термосистемы конденсатом. Для конденсационных термометров класс точности устанавливается для последних двух третей температурной шкалы.

Интервал работы газовых манометрических термометров от -150 до 600°C . Диапазон шкал этих приборов нормирован следующим рядом значений: 100; 150; 200; 250; 300; 400; 600°C . В качестве рабочего вещества при температурах до 200°C используется азот, при более высоких температурах — вплоть до 600°C — аргон.

Изменение давления в термосистеме газовых термометров прямо пропорционально начальному давлению и диапазону измеряемых температур. Из-за частичного перетекания газа из термобаллона в капилляр и манометрическую пружину линейная характеристика нарушается, однако нелинейное искажение невелико, так что шкала газовых термометров оказывается практически линейной. Начальное давление в системе зависит от диапазона измеряемых температур. Так, при $\Delta t = 0 \dots 100^{\circ}\text{C}$ начальное давление $p_n \approx 3,8 \text{ МПа}$, при $\Delta t = 0 \dots 600^{\circ}\text{C}$ $p_n \approx 1,5 \text{ МПа}$.

Манометрические термометры с жидким заполнителем рассчитаны на работу в интервале температур от -150 до 300°C с диапазонами измерения 25; 50; 100; 150; 200; 250°C . В качестве рабочих веществ использовались пропиловый спирт, метаксилон, ртуть, в разработках последних лет — полиметилсилоксановая жидкость ПМС-5 (ГОСТ 13032—67).

Объем термобаллона существенно зависит от выбора жидкости и диапазона измерений данного термометра. Начальное давление в системе выбирается значительным с целью снижения погрешности, вызванной гидростатическим давлением, которое определяется разностью высот расположения термобаллона и его измерительной системы. С учетом этого фактора длина соединительного капилляра для жидкостных манометрических термометров ограничена десятью метрами. Шкалы жидкостных термометров практически линейны.

Конденсационные (парогазовые) манометрические термометры перекрывают интервал температур от -50 до 300°C с диапазонами измерений для различных приборов 50; 100; 120; 150; 200 и 300°C .

Для заполнения термосистемы применяют фреон-22 (CHF_2Cl) ГОСТ 8502—73, предел измерений —25...80 °С; пропилен (C_3H_6), предел измерений —50...60 °С; хлористый метил (CH_3Cl), предел измерений 0...125 °С; ацетон ($\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$), ГОСТ 2768—69, предел измерений 100...200 °С; этилбензол (C_8H_{10}), ГОСТ 9385—60, предел измерений 160...300 °С.

Зависимость давления насыщенного пара от температуры жидкости, выражаемая формулой Клапейрона — Клаузиуса, является существенно нелинейной. Начальное давление в манометрической системе конденсационных термометров определяется родом наполнителя и начальным значением шкалы термометра. Для данного наполнителя верхний предел шкалы ограничен значением его критической температуры. Неравномерность шкалы термометра может устраняться принятием дополнительных конструктивных мер — введением ограничителей деформации манометрической пружины.

В отличие от газовых термометров, термобаллон конденсационных термометров невелик. Так, для термометра ТПП-СК диаметр и длина термобаллона составляют 16 и 78 мм. В тех же условиях длина термобаллона газовых термометров варьируется от 125 до 400 мм при диаметре 20 мм.

6.3. Погрешности манометрических термометров и способы их уменьшения

Методические погрешности манометрических термометров вызваны действием ряда факторов: 1) отсутствием термодинамического равновесия между термобаллоном, его наполнителем и исследуемой средой; 2) отклонением температуры или внешнего давления от условий, для которых рассчитывался и градуировался термометр; 3) гидростатическим давлением, зависящим от разности уровней расположения термобаллона и регистрирующих звеньев прибора.

Измерительным преобразователем манометрических термометров является термобаллон, а собственно чувствительным элементом — рабочее вещество (наполнитель) термобаллона. Задача о том, насколько отличается температура наполнителя термобаллона от температуры исследуемой среды, решается аналогично решению для ИПТ других приборов контактного действия. Здесь в полной мере применимы и справедливы оценочные зависимости и рекомендации по уменьшению составляющих погрешности от действия теплоотвода, излучения или инерционности, приведенные в гл. 4.

В практике измерений термобаллон термометра может устанавливаться в цилиндрический карман (защитную гильзу), а зазор между термобаллоном и гильзой заполняется с целью улучшения контакта жидкостью или металлическими опилками. При таком способе монтажа погрешности из-за теплоотвода и тепловой инерционности термобаллона увеличиваются.

Динамическая составляющая методической погрешности манометрических термометров изменяется в широких пределах в зависимости от типа термометра, размеров термобаллона, условий его теплообмена с исследуемой средой и может оцениваться по рекомендациям, приведенным в гл. 4. ГОСТ 8624—71 определяет максимальные значения показателей тепловой инерции манометрических термометров всех типов в пределах: (500..800) с — при погружении термобаллона в спокойный воздух или иной газ; (60...120) с — при движении газообразной среды со скоростью до 7 м/с; (15...30) с — при погружении в спокойную воду или жидкость с близкими к ней значениями

коэффициента теплоотдачи. Минимальные значения показателей тепловой инерции при интенсивном теплообмене (3...6) с.

Количество термометрического вещества в термобаллоне не постоянно и определяется значениями его температуры. Вытесняемый из термобаллона в капилляр наполнитель (газ, жидкость) будет принимать значения температуры, соответствующие температуре окружающей среды (например, температуре воздуха помещения, где находится регистрирующая часть прибора и проходит дистанционный капилляр). Отклонение этой температуры от нормального значения приводит к возникновению дополнительной погрешности. Для ее снижения при проектировании манометрических газовых и жидкостных термометров устанавливают определенное соотношение между внутренними объемами термобаллона, манометрической пружины и капилляра, а также регламентируют глубину погружения термобаллона в исследуемую среду в зависимости от длины капилляра. Перечисленные меры позволяют нормировать дополнительную погрешность манометрических термометров, возникающую из-за непостоянства температуры окружающего воздуха. Согласно ГОСТ 8624—71 изменение показаний термометров, вызываемое влиянием температуры окружающего воздуха при отклонении ее от 20 °С, не должно превышать значений, вычисленных по формуле

$$\Delta = \pm (x + k\Delta t), \quad (6.1)$$

где Δ — изменение показаний прибора относительно диапазона измерений, %; x — значение допускаемого непостоянства показаний термометров; равное половине абсолютного значения основной допускаемой погрешности, %; k — температурный коэффициент, который для газовых, жидкостных и конденсационных наполнителей должен быть соответственно не более 0,05; 0,075 и 0,04%/К; Δt — абсолютное значение отклонения температуры воздуха от нормального значения, принимаемого равным 20 °С.

Влияние изменения температуры воздуха на механические характеристики пружины компенсируется термобиметаллическим корректором (см. рис. 6.1, а). Изменение давления окружающего воздуха приводит к появлению погрешности, характерной в основном для конденсационных термометров. Эта погрешность является составной частью нормируемой для всех манометрических термометров допускаемой основной погрешности (см. ГОСТ 8.305—78). Дополнительная гидростатическая погрешность, характерная для жидкостных и конденсационных манометров, нормирована ограничениями длины их капилляров.

Методы и средства поверки манометрических термометров определены ГОСТ 8.305—78. Правила размещения, монтажа и технического обслуживания манометрических термометров приводятся в технических описаниях и инструкциях по их эксплуатации.

6.4. Характеристики промышленных манометрических термометров

Характеристики отечественных манометрических термометров общетехнического назначения приведены в табл. 6.1—6.4, составленных на основе рабочих материалов. Длина погружения термобаллона газовых термометров зависит от длины дистанционного капилляра, а жидкостных — от диапазона измеряемых температур. Значения длин по-

гружения термобаллонов, технические данные сигнализирующих, записывающих и регулирующих устройств приводятся в описаниях и инструкциях для каждого типа манометрических термометров.

Т а б л и ц а 6.1. Газовые манометрические термометры

Обозначение термометра	Название термометра
ТГП-160	Манометрический газовый показывающий
ТПГ4	Манометрический показывающий газовый
ТПГ4-V	То же, с пневматическим выходным сигналом
ТПГ4-VI	То же, с электрическим выходным сигналом
ТПГ-СК	Манометрический показывающий газовый сигнализирующий электроконтактный
ТГС-711	Манометрический самопишущий газовый с приводом диаграммы от синхронного микродвигателя
ТГ2С-711	То же, с записью двух температур
ТГ-711 Р	То же, с пневматическим изодромным регулирующим устройством
ТГС-712	Манометрический самопишущий газовый с приводом диаграммы от часового механизма
ТГ2С-712	То же, с записью двух температур
ТГ-712 Р	То же, с пневматическим изодромным регулирующим устройством
ТДГ-П	Датчик температуры ГСП бесшкальный с газовой манометрической термосистемой, с пневматическим выходным сигналом
ТДГ-Э	То же, с электрическим выходным сигналом

Т а б л и ц а 6.2. Жидкостные манометрические термометры

Обозначение термометра	Название термометра
ТПЖ4	Манометрический показывающий жидкостный
ТПЖ4-V	То же, с пневматическим выходным сигналом

Обозначение термометра	Название термометра
ТПЖ4-VI	То же, с электрическим выходным сигналом
ТЖС-711	Манометрический самопишущий жидкостный с приводом диаграммы от синхронного микродвигателя
ТЖ2С-711	То же, с записью двух температур
ТЖ-711 Р	То же, с пневматическим изодромным регулирующим устройством
ТЖС-712	Манометрический самопишущий жидкостный с приводом диаграммы от часового механизма
ТЖ2С-712	То же, с записью двух температур
ТЖ-712 Р	То же, с пневматическим изодромным регулирующим устройством
ТДЖ-П	Датчик температуры ГСП бесшкальный с жидкостной манометрической термосистемой, с пневматическим выходным сигналом
ТДЖ-Э	То же, с электрическим выходным сигналом

Т а б л и ц а 6.3. Конденсационные манометрические термометры

Обозначение термометра	Название термометра
ТКП-160	Манометрический конденсационный показывающий
ТПП4-III	Манометрический конденсационный показывающий сигнализирующий
ТПП4-IV	То же, во взрывозащитном исполнении
ТПП-СК	Манометрический конденсационный сигнализирующий электроконтактный
ТКП-60 СГ	Манометрический показывающий конденсационный с сигнализацией предельного значения температуры
ТПП-М	Манометрический показывающий конденсационный для измерения температуры молочных и мясных продуктов

Т а б л и ц а 6.4. Характеристики манометрических термометров

Обозначение термометра	Диапазон измере- мых температур, °С		Длина дистанционного капилляра, м	Класс точности
	от	до		
ТПГ4, ТПГ4-V, ТПГ4-VI	-50	+50	1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25	1
	-50	+100		
	-50	+150		
	+50	+150	1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25	1,5
	0	+400		
	0	+100	1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40	1,5
	0	+150	1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40	1
	0	+200		
	0	+300		
	+100	+300		
	0	+600	1,6; 2,5; 4; 10	1,5
	+100	+500		
	+200	+500		
	+200	+600		
ТПЖ4, ТПЖ4-V, ТПЖ4-VI	0	+50	1,6; 2,5; 4; 6; 10	1
	-50	+50		
	0	+100		
	0	+200		
	+100	+300		
	0	+150	1,6; 2,5; 4; 6; 10	1,5
	-50	+100		
	-50	+150		
ТПП4-III, ТПП4-IV	-25	+25	1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16	1,5
	-10	+50		
	0	+60		
	0	+100		
	+25	+125		
	+100	+200		
	+200	+300		
	-50	+50	1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25	1
ТГС-711, ТГС-712, ТЖ2С-711, ТЖ2С-712	-50	+100		
	-50	+150		
	0	+150	1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40	1
	0	+200		
	0	+300		
	+100	+300		
	0	+100	1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25	1,5
	+50	+150		
	0	+400		
	0	+600	1,6; 2,5; 4; 6; 10	1,5
	+100	+500		
	+200	+500		
	+200	+600		
	0	+50	1,6; 2,5; 4; 6; 10	1
	-50	+50		
	0	+100		
ТЖС-711, ТЖС-712, ТЖ2С-711, ТЖ2С-712	+50	+150		
	+100	+300		
	-50	+150	1,6; 2,5; 4; 6; 10	1,5
	0	+200		

Продолжение табл. 6.4

Обозначение термометра	Диапазон измеря- емых температур, °С		Длина дистанционного капилляра, м	Класс точности
	от	до		
ТПП-160, ТКП-160	-50	+50	0,15	1; 1,5; 2,5
	-50	+100		
	-50	+150		
	0	+150		
	+100	+300		
	0	+200	0,15	1,5; 2,5
	0	+50		
	0	+100		
	0	+120		
	+50	+150		
ТПГ-СК	-50	+50	1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25	2,5
	0	+100		
	0	+150		
	0	+200		
	0	+400		
ТПП-СК	-25	+35	1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16;	2,5
	0	+60		
	0	+100		
	+100	+200		
	0	+200		
ТПП-М ТКП-60 СГ	0	+100	— 1,6; 2,5 4; 6	1,5; 2,5 2,5; 4
	0	+120		
	+50	+150		
	+100	+250		
	-25	+75		
ТДГ-П, ТДГ-Э	0	+100	2,5	1
	0	+150		
	0	+200		
	-50	+50		
	-50	+100		
	+25	+125	2,5	1,5
	+50	+150		
	+100	+200		
	+200	+300		
	0	+300		
ТДЖ-П, ТДЖ-Э	-50	+150	2,5	1
	+100	+300		
	-50	+50		
	-50	+100		
	-25	+25		
	-10	+15	2,5	1
	0	+25		
	0	+50		
	0	+100		
	0	+150		
	0	+200	2,5	1
	+50	+100		
	+100	+150		
	+25	+125		
	+50	+150		

Действие ТС основано на температурной зависимости сопротивлений. Указанным свойством обладает множество материалов, но лишь немногие из них удовлетворяют вторичным эксплуатационным требованиям, связанным со стабильностью свойств и нечувствительностью к внешним воздействиям по другим физическим параметрам (давление, плотность магнитного потока, потока нейтронов и т.п.). Всему комплексу метрологических и эксплуатационных требований удовлетворяет относительно узкая номенклатура материалов, представленных разными видами веществ, заметно способных проводить электрический ток: металлами, полупроводниками, электролитами.

ТС обладают хорошими термометрическими свойствами. Типичные виды зависимости сопротивления от температуры представлены

на рис. 7.1. Как видно из рисунка, ТКС сравнительно невелик ($0,3... 0,6 \% \cdot K^{-1}$) и, как правило, положителен для металлов (кривая 2). Для полупроводников α в среднем на порядок больше, чем для металлов, отрицателен для термисторов (кривая 4) и положителен для позисторов (кривая 1). Электролиты (кривая 3) характеризуются ступенчатым

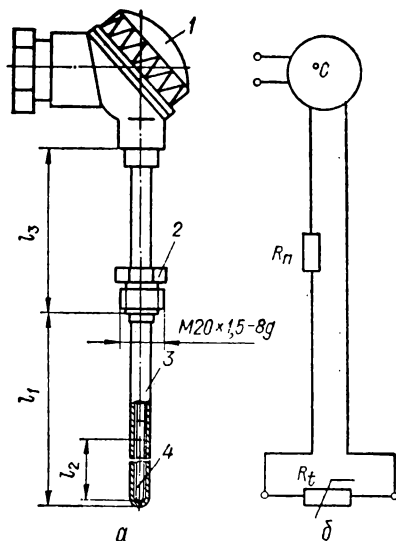
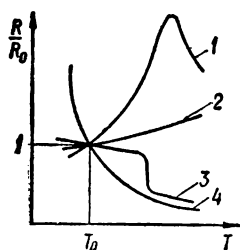


Рис. 7.1. Зависимость сопротивления различных ТС от температуры:

1 — позисторы; 2 — металлы; 3 — электролиты; 4 — термисторы.

Рис. 7.2. ТС (а) и схема его включения (б):

1 — головка; 2 — штуцерная гайка; 3 — арматура; 4 — чувствительный элемент.

переходом сопротивления при температуре начала ионной проводимости.

Простые схемные решения позволяют получить широко растянутый малый диапазон измерения на любом уровне. Благодаря высоким метрологическим качествам платиновые ТС используются для воспроизведения МПТШ-68 в диапазоне температур от 13,81 до 903,89 К. Полупроводниковые и электролитные ТС обладают экстремальными характеристиками, поддающимися конструктивной вариации в широких пределах. Поэтому они, наряду с металлическими термометрами, эффективно используются в системах измерения, контроля и автоматизации в промышленных технологических комплексах.

ТС состоит из чувствительного элемента соответствующей конструкции, защитной арматуры и соединительных проводов (рис. 7.2). Изменение сопротивления чувствительного элемента в виде падения напряжения или тока, передаваемых электрической линией связи непосредственно или при помощи ИПТ, фиксируется показывающим прибором или регулятором. Способ включения ТС определяется схемой вторичного прибора и диапазоном измеряемой температуры.

7.1. Платиновые ТС

Основные требования, которым должен удовлетворять материал чувствительного элемента ТС, следующие: 1) нечувствительность к малым примесям, которые могут появиться в процессе изготовления или эксплуатации; 2) простота технологии получения и изготовления. В настоящее время обсуждается возможность и целесообразность применения платиновых ТС для воспроизведения Международной практической температурной шкалы до температуры 1064,43 °С. В промышленных условиях применение платиновых ТС нормировано для измерений до 1100 °С.

Зависимость относительного сопротивления от температуры для платины описывается уравнениями, регламентированными МПТШ-68. Для измерения температуры в диапазоне от 10 до 15 К используется уравнение вида*

$$W(T) = A + BT^2 + CT^5.$$

Для измерения низких температур платиновыми ТС с соблюдением требований метрологической культуры целесообразно пользоваться зависимостью $T = f(W)$ в виде стандартной таблицы.

При измерении низких температур сопротивление ТС уменьшается и остаточное сопротивление составляет уже несущественную часть всего сопротивления цепи. При этом наблюдается значительный разброс номинальных статических характеристик ТС, обусловленный степенью чистоты применяемой платиновой проволоки, способом ее получения, видом термической обработки, конструкцией преобразователя и т.п. Это усложняет применение платиновых ТС в низкотемпературной термометрии, так как возникает необходимость индивидуальной номинальной статической характеристики ТС и вторичных приборов, работающих в комплекте с ними.

С целью обеспечения взаимозаменяемости ТС они разбиваются на группы с похожими характеристиками и комплектуются вторичными приборами, имеющими соответствующие статические характеристики. При этом вторичные приборы могут иметь вставки для под-

* Уравнение предложено Л. Д. Ландау, А. А. Померанчуком, а затем и К. Р. Барбером.

Стройки измерительной схемы к фиксированным номинальным статическим характеристикам.

В зависимости от условий применения, требований, предъявляемых к точности измерения, промышленностью выпускаются платиновые ТС различных конструкций. Такое разнообразие конструкций объясняется тем, что все требования, предъявляемые различными объектами измерения, не могут быть обеспечены одной и той же конструкцией.

Требования к технологии изготовления ТС. Для воспроизведения шкалы МПТШ-68 при изготовлении платиновых ТС чувствительный элемент выполняется из свободной от натяжения, отожженной, чистой платиновой проволоки с отношением $W_{100} > 1,39250$. При этом короткие участки четырехпроводной линии термопреобразователя, примыкающие к спирали, изготавливаются из платины. Сопротивление изоляции элементов конструкции должно быть достаточно высоким во избежание шунтирования сопротивления ТС. Составные части ТС, находящиеся в непосредственной близости к чувствительному элементу, изготавливаются из чистых материалов, не реагирующих с платиной при измерении высоких температур.

Конструкции чувствительных элементов. Для измерения температур до 630,74 °С применяются ТС, чувствительные элементы которых изготавливаются из платиновой проволоки диаметром от 0,05 до 0,2 мм, свободной от натяжений, бифилярно намотанной на каркас для устранения влияния магнитных помех. В качестве изоляционного каркаса применяются слюдяные пластины, керамические стержни крестообразной формы сечения из кварца или окиси алюминия с канавками, в которых размещаются спирали. Слюда в естественном состоянии содержит связанную воду и адсорбированные газы. В процессе измерения выделяющиеся газы и водяные пары могут захватываться проволокой чувствительного элемента с одновременным изменением сопротивления. Во избежание этого слюдяные каркасы следует перед навивкой прокаливать в вакууме. В общем, слюду не рекомендуется применять при температурах выше 450 °С. Кварц, алунд и фарфор лучше сохраняют изоляционные показатели. При 630 °С ток, протекающий по изолятору каркаса, обуславливает погрешность порядка 10^{-3} К. При дальнейшем повышении температуры погрешность, вызванная потерями изоляционных характеристик каркаса, быстро растет и в значительной мере завысит от технологии изготовления каркаса.

После изготовления чувствительный элемент стабилизируют нагреванием до 800 °С и выдержкой в течение 30 мин. На протяжении длительного времени для измерения температуры применялась конструкция платинового ТС, предложенная Г. Л. Каллендером, в которой на слюдяной крест наматывалась платиновая проволока диаметром 0,1...0,2 мм. Позже появились ТС с керамическим каркасом. В настоящее время в платиновых ТС для измерений с высокой точностью сведено к минимуму напряжение в проволоке, возникающее от деформации спирали. Проволока диаметром 0,1 мм свивается в спираль диаметром 0,45 см, а затем бифилярно навивается на слюдяной крестообразный каркас, помещаемый в защитную трубку из пирекса диаметром 7—7,5 мм. Чувствительный элемент соединен с головкой термопреобразователя золотыми проводами длиной 430 мм. ТС, чувствительный элемент которого изготовлен из платиновой проволоки диаметром 0,05 мм, имеет сопротивление при 0 °С около 25 Ом. Платиновая спираль диаметром 1,5 мм помещается в тонкую U-образную пирексовую трубку с внутренним диаметром, незначительно превышающим внешний диаметр спирали, и толщиной стенки 0,5 мм. К концам спирали припаяны платиновые проводники, предохраняющие спираль от натяже-

ния. Интересна конструкция термопреобразователя, представляющая собой двухканальную трубку из окиси кремния, в каналы которой помещена спираль чувствительного элемента. В ТС Стрелкова на кварцевый геликоидальный каркас монтируется платиновая спираль из проволоки диаметром 0,07 мм. К концам платиновой проволоки чувствительного элемента приварены небольшие, жестко скрепленные с каркасом выводные проводники из платиновой проволоки. К каждому проводнику приварено по два вывода из серебряной, золотой или платиновой проволоки диаметром 0,2—0,5 мм. Чувствительный элемент помещается в защитную трубку из плавленного кварца.

Для измерения низких и средних температур каркасы чувствительных элементов изготавливаются из стекла с близким к платине коэффициентом расширения. Для измерения температур в диапазоне от 630 до 1100 °С применяется платиновая проволока диаметром от 0,3 до 0,6 мм, так как проволока меньших диаметров подвергается большому влиянию посторонних газов и паров. При этом для каркаса используется керамика из синтетического сапфира. Для измерений умеренных температур применяются различные конструкции чувствительных элементов из платиновой проволоки, покрытой изоляционным лаком.

Для защиты платиновой спирали от взаимодействия с выделениями каркаса и других конструктивных элементов применяются ингибиторные засыпки из боратов и галогенидов щелочноземельных металлов.

Чувствительные элементы промышленных ТС. Для широкого диапазона выпускаемых промышленностью ТС существует сравнительно узкая номенклатура чувствительных элементов, которые в поисковых исследованиях и пачальных технологических разработках могут применяться самостоятельно. Основные их технические характеристики приведены в табл. 7.1, а допустимые в соответствии с ГОСТ 6651—78 отклонения электрических сопротивлений ТС от номинальных значений — в табл. 7.2.

При изготовлении чувствительных элементов технических платиновых ТС допустимое отклонение номинального значения при 0 °С должно соответствовать I—III классам, медных — II и III классам.

Таблица 7.1. Основные характеристики чувствительных элементов платиновых промышленных ТС

Обозначение	Количество элементов и номинальная статическая характеристика по ГОСТ 6651—78	Длина чувствительного элемента	Длина обмотки, мм	Диапазон измеряемых температур, °С	
				от	до
5Ц4. 679. 200-07	1 × 50 П	40	30	—200	750
5Ц4. 679. 200-09	1 × 100 П	54	45	—260	750
5Ц4. 679. 200-10	2 × 50 П	54	45	—200	750
5Ц4. 679. 200-11	2 × 100 П	104	90	—260	750
5Ц4. 679. 200-12	1 × 50 П	40	30	—200	600
5Ц4. 679. 200-14	1 × 100 П	54	45	—200	600
5Ц4. 679. 200-16	2 × 50 П	54	45	—200	600
5Ц4. 679. 200-17	2 × 100 П	104	90	—200	600

Примечание. Измерительный ток 5 мА. Показатель тепловой инерции по ГОСТ 6651—78 9 с. Диаметр чувствительного элемента 4,2 мм.

Таблица 7.2. Допустимые отклонения сопротивления ТС от номинального сопротивления

Материал чувствительного элемента	Допустимое отклонение при 0° С, %, для классов ТС				
	I	II	III	IV	V
Платина	$\pm 0,05$	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,8$
Медь	—	$\pm 0,1$	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$

Таблица 7.3. Значения и допуски относительного сопротивления W_{100} технических чувствительных элементов

Материал чувствительного элемента	W_{100} для классов ТС				
	I	II	III	IV	V
Платина	$1,3910^{+0,0015}_{-0,0005}$	$1,3910^{+0,0015}_{-0,0010}$	$1,3910^{+0,0015}_{-0,0010}$	$1,3910^{+0,0015}_{-0,0030}$	$1,3910^{+0,0015}_{-0,0050}$
Медь	—	$1,4280 \pm 0,0010$	$1,4280 \pm 0,0020$	$1,4280 \pm 0,0030$	$1,4280^{+0,0030}_{-0,0050}$

Время работы, после которого чувствительный элемент может быть переведен в другой класс, указывается в паспорте во время его поверки. В зависимости от класса прибора отношение сопротивления чувствительного элемента при 100 °С к сопротивлению при 0 °С (W_{100}) нормировано ГОСТ 6651—78 и должно соответствовать значениям, приведенным в табл. 7.3. В промышленном производстве чувствительных элементов технических платиновых ТС W_{100} должно соответствовать I—III классам, медных — II и III классам.

Концы измерительной спирали в образцовых ТС соединяются сваркой с U-образными короткими проводами из платины большего диаметра, к которым привариваются соединительные провода, идущие к головке. Материал соединительных проводов выбирается в зависимости от уровня измеряемой температуры и других условий эксплуатации, для которых приборы предназначены. При низких температурах до 300 °С и умеренной вибрации используются медные проводники, при умеренных температурах до 500 °С — серебряные, при температурах, превышающих 500 °С, по мере ее роста, — золотые, палладиевые и платиновые проводники. В случае повышенной вибрации рекомендуются более жесткие сплавные провода, например платинородиевые.

Сопротивление двух соединительных проводов чувствительного элемента при 0 °С не должно превышать 0,1 % его номинального сопротивления. Для изоляции соединительных проводов применяются слюдяные или керамические шайбы с отверстиями, а также трубочки из фарфора, кварца или стекла. Для высокотемпературных ТС используется изоляционный материал из сапфира в виде шайб и бус или другой керамики. Основные параметры технических платиновых ТС по ГОСТ 6651—78 приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4. Основные параметры платиновых и медных ТС

Тип	Номинальное сопротивление при 0 °С, Ом	Условное обозначение номинальной статической характеристики преобразования	Диапазон измеряемой температуры, °С	
			от	до
ТСП	1	1П	—50	1100
	5	5П	—100	1100
	10	10П	—200	1000
	46	гр. 21	—260	1000
	50	50П	—260	1000
	100	100П	—260	1000
ТСМ	500	500П	—260	300
	10	10М	— 50	—200
	50	50М	— 50	—200
	53	гр. 23	— 50	180
	100	100М	—200	200

После изготовления чувствительный элемент стабилизируется нагреванием до температуры, на 5 % превышающей верхний предел применения (отсчет в градусах Цельсия), но не ниже 450 °С.

Критерием эффективности отжига и полученной стабильности характеристики ТС является постоянство его сопротивления в реперной точке, в качестве которой обычно используется тройная точка воды.

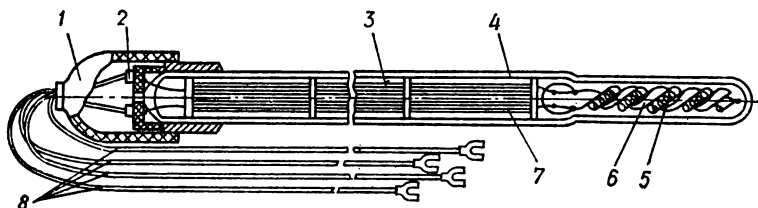


Рис. 7.3. Платиновый ТС конструкции Стрелкова:

1 — алюминиевый колпачок; 2 — клеммы; 3 — токовые провода; 4 — кварцевая оболочка; 5 — измерительная спираль; 6 — каркас; 7 — потенциальные выводы; 8 — подводящие провода.

Согласно рекомендации МПТШ-68 для серийных высокотемпературных ТС повышенной точности относительное изменение сопротивления в тройной точке воды не должно превышать $4 \cdot 10^{-6} R$, что эквивалентно 1 мК.

На стабильность показаний ТС заметно влияет скорость охлаждения. Вакансии, образованные при высокой температуре, при быстром охлаждении замораживаются. Относительное изменение сопротивления ТС из-за быстрого охлаждения достигает $2 \cdot 10^{-4} R$, что соответствует 0,05 К.

ТС для исследовательских работ характеризуются повышенной чувствительностью к изменению температуры, воспроизводимостью, стабильностью и удобством при эксплуатации. Эти свойства в известной степени зависят от сопротивления чувствительного элемента, определяющей величиной которого является сопротивление при 0 °С. По этому признаку ТС делятся на низкоомные и высокоомные. Увели-

чение сопротивления чувствительного элемента при 0°C приводит к увеличению его размеров и инерционности, упрощая, однако, работу с ТС, так как появляется возможность применения более простых измерительных схем. Эталонные и образцовые платиновые ТС, работающие в диапазоне температур от $-182,97$ до 630°C , изготавливаются с $R_0 = 10\ \text{Ом}$.

Для точных измерений температуры применяется конструкция с чувствительным элементом в виде спирали Стрелкова (рис. 7.3). Для измерения средних температур (от 0 до 630°C) применяется платиновый ТС (ПТС-10) с $R_0 \sim 10\ \text{Ом}$; для измерения низких температур (от $-182,97$ до 0°C) — с $R_0 \sim 100\ \text{Ом}$; для измерения сверхнизких температур (от $13,81$ до $273,15\ \text{K}$) — с $25\ \text{Ом} \leq R_0 \leq 1000\ \text{Ом}$ при температуре тройной точки (ТСПН-1 и ТСПН-2, ГОСТ 12377—67).

7.2. ТС с чувствительными элементами из других материалов

В случаях, когда не требуется высокая точность измерения, например для технических целей, чувствительные элементы ТС изготавливаются не из дорогой платины, а из других чистых металлов. Для измерения сверхнизких температур чувствительные элементы изготавливаются главным образом из сплавов и полупроводников. Для измерения средних температур в качестве материала чувствительного элемента ТС применяются, наряду с платиной, медь, никель, вольфрам, железо.

Требования к конструкциям ТС с чувствительными элементами из других материалов аналогичны требованиям, предъявляемым к платиновым чувствительным элементам. При этом необходимо учитывать конкретные физические и химические свойства этих материалов.

Медные ТС. Обычная медь, поставляемая системой снабжения и торговли в виде проволоки и проводов всех требуемых размеров, не дефицитна, дешева, чиста и гомогенна — вполне удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к материалу чувствительных элементов ТС для измерения умеренных температур. Существенный практический недостаток меди — при температуре выше 300°C она начинает активно окисляться. Поэтому медь применяется в чувствительных элементах ТС для измерения температур не выше 200°C . Изоляционные покрытия медных проводов — лак или шелк — также не выдерживают влияния высоких температур. К числу недостатков меди следует отнести и ее малое удельное сопротивление ($\rho = 1,7 \times 10^{-8}\ \text{Ом} \cdot \text{м}$).

ТКС определяется по сопротивлениям R_0 и R_t чувствительного элемента медного ТС, измеренных соответственно при точке таяния льда и кипения воды. В диапазоне температур от -50 до 200°C зависимость сопротивления меди от температуры носит линейный характер: $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$.

Согласно ГОСТ 6651—78, медные ТС применяются для длительного измерения температуры в диапазоне от -200 до 200°C . Допустимые значения отклонения сопротивления при 0°C от номинального приведены в табл. 7.2; отношения сопротивления медных ТС при 100°C к сопротивлению при 0°C — в табл. 7.3; основные параметры технических медных ТС — в табл. 7.4; основные характеристики чувствительных элементов медных ТС — в табл. 7.5.

Бескаркасный чувствительный элемент медных промышленных ТС (рис. 7.4) имеет безындуктивную намотку из медной проволоки, покрытой фторопластовой пленкой. К намотке припаяны два вывода.

Для устойчивости элемент помещается в тонкостенную металлическую гильзу, засыпается керамическим порошком и герметизируется замазкой. В зависимости от действительных условий изготавливаются чувствительные элементы специальных конструкций: от сосредоточенной обмотки небольшой длины для измерения температуры подшипников до обмотки, растянутой на несколько метров, для измерения средней температуры нефти в резервуарах. К чувствительному элементу припаиваются соединительные медные провода, которые электрически

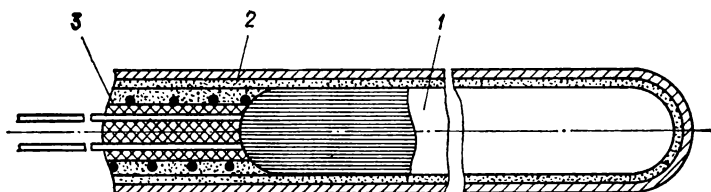


Рис. 7.4. Чувствительный элемент, изготовленный из меди:

1 — медная пров. лок; 2 — металлическая гильза; 3 — замазка.

изолированы оплеткой из термостойкой нити. В качестве защитной арматуры применяются трубы из различных сталей. После изготовления чувствительные элементы стабилизируются нагреванием при температуре, превышающей температуру верхнего предела применения на 20 К. Погрешность медных ТС с бескаркасным чувствительным элементом за счет изменения R_0 и W_{100} после 50 000 ч работы при 160 °C

Т а б л и ц а 7.5. Основные характеристики чувствительных элементов медных промышленных ТС

Обозначение	Количество элементов и номинальная статическая характеристика по ГОСТ 6651—78	Длина чувствительного элемента	Длина обмотки, мм	Диапазон измеряемых температур, °C	
				от	до
5Ц4. 679. 028	1 × 50 М	50	40	—50	+200
5Ц4. 679. 028-01	1 × 100 М	80	70	—50	+200

Примечание. Измерительный ток 5 мА. Показатель тепловой инерции по ГОСТ 6651—78 10 с. Диаметр чувствительного элемента 5 мм.

достигает 1 %. Измерительный ток, протекающий по чувствительному элементу серийно выпускаемого термопреобразователя ТСМ-0879, равен 15 мА на 1 К. Сопротивление чувствительного элемента медного ТС не так стабильно, как платинового. Если чувствительный элемент не подвергать резким тепловым ударам или механическим деформациям, то в течение длительного времени можно поддерживать стабильность показаний ТС с погрешностью $\pm 0,01$ К.

ТС из других чистых металлов. Кроме платины и меди в качестве материала для чувствительного элемента ТС применяют никель, железо, вольфрам, свинец, индий, олово, кадмий, ртуть, галлий.

Никелевые ТС. Преимущества никеля перед медью — высокие ТКС ($\alpha = 6,4 \cdot 10^{-3}$) и удельное сопротивление ($\rho = 12,8 \times$

$\times 10^{-3}$ Ом · м), недостаток — большое влияние загрязнений на ТКС. Сопротивление никелевых ТС, предназначенных для измерения температур в диапазоне от 0 до 200 °С, описывается таким же уравнением, как и для платиновых ТС ($A = 5,43 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹, $B = 7,85 \cdot 10^{-6}$ К⁻²). Нелинейные члены в уравнениях сопротивления имеют разные знаки (для никеля — положительный, для платины — отрицательный). Это открывает возможность создания ТС с линейной характеристикой до 350 °С путем последовательного включения платиновой и никелевой обмоток с отношением сопротивлений, равным 12 : 1, при 0 °С. Никель претерпевает структурное превращение при 350 °С.

Железные ТС применяются для измерения температур в диапазоне от 0 до 100 °С ($A = 6,5 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹).

Вольфрамовые ТС обеспечивают удовлетворительную точность при измерениях температур до 1000 °С. При измерении высоких температур

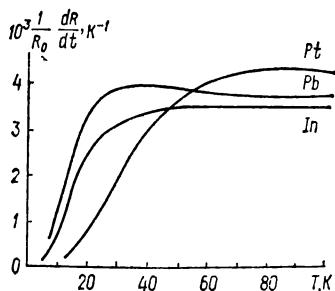


Рис. 7.5. Зависимость ТКС платины, олова, индия от температуры.

чувствительный элемент необходимо помещать в герметичную арматуру.

Свинцовые и индиевые ТС хорошо зарекомендовали себя при измерении низких температур. При температуре ниже 50 К их ТКС (рис. 7.5) заметно больше, чем у платины, и они эффективно работают вплоть до перехода в состояние сверхпроводимости (Pb — 7,2 К, In — 3,4 К).

Механические напряжения затрудняют использование при измерениях температур ТС. Поэтому неоднократно предпринимались попытки применения в ТС жидких металлов, заполняющих кварцевые капилляры. Использование для изготовления капилляров плавленого

кварца, имеющего малый коэффициент термического расширения, практически решает вопрос о влиянии вариации температуры на размеры чувствительного элемента. Для жидкометаллических ТС применялись также сплавы ртути с галлием и таллием. Ртуть хорошо зарекомендовала себя и в твердом состоянии для измерений вплоть до наступления сверхпроводимости.

По ряду характеристик сплавы имеют преимущества перед чистыми металлами для применения в качестве материала чувствительных элементов ТС: они более прочны, стойки при высоких температурах и в агрессивных средах, их удельное сопротивление в несколько раз больше. Однако ТКС при средних и высоких температурах у них ниже, чем у чистых металлов, — за исключением сплава никеля с железом, для которого $\alpha = 4,8 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹.

По сравнению с никелем удельное сопротивление сплава никеля с железом в три раза больше, что позволяет упростить конструкцию чувствительного элемента и повысить ее надежность. Характеристики этого сплава не одинаковы от партии к партии, в связи с чем необходимо применять индивидуальную градуировку. Рабочий диапазон таких ТС — от 0 до 600 °С. При наличии магнитных полей их не рекомендуется применять.

Константан и манганин широко используются как материалы, сопротивление которых в области нормальных температур пренебрежимо мало зависит от температуры. Однако при температуре ниже 80 К эта зависимость настолько возрастает, что оба сплава используются для измерения температур вплоть до температуры кипения гелия.

ТКС манганина изменяется от $6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ при 80 К до $8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ при 10 К.

В ТС с чувствительным элементом из манганина не наблюдается однозначная связь между сопротивлением при комнатной температуре и тех температурах, при которых производится измерение. Поэтому они требуют индивидуальной градуировки. Как большинство ТС из сплавов, они также чувствительны к влиянию магнитных полей.

7.3. Промышленные ТС

Чувствительные элементы с соединительными проводами называются измерительными пакетами. Соединительные провода измерительного пакета должны быть электрически изолированы друг от

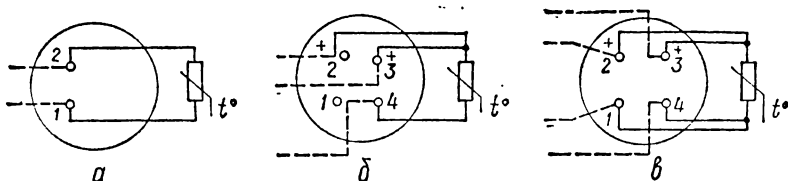


Рис. 7.6. Схема измерительного пакета:

а — двухпроводного; б — трехпроводного; в — четырехпроводного.

друга. При измерении температуры до 300 °С с целью обеспечения надежной изоляции пакетов ТС применяются изоляционные лакоткани, эмали, оплетки и др.; при измерении температуры выше 300 °С — бусы из электроизоляционной керамики.

Для устранения влияния температуры на сопротивление соединительных проводов их собственное сопротивление выбирают малым по сравнению с сопротивлением чувствительного элемента. При 0 °С не должно превышать 0,1 % для платиновых ТС и 0,2 % — для медных. С этой же целью ТС подключают по трех- и четырехпроводной схеме (рис. 7.6). Для компенсации изменения сопротивления соединительных проводов промышленностью выпускаются также ТС с дополнительными соединительными проводами (рис. 7.7). Соединительные провода измерительного пакета подключаются к клеммам контактной колодки или контактам корпуса пластмассовой головки ТС. На рис. 7.8 показаны типы измерительных пакетов и конструкции наиболее распространенных медных и платиновых ТС.

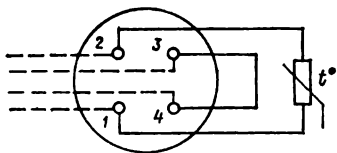


Рис. 7.7. Схема измерительного пакета с компенсационными проводами.

Подключение соединительных проводов измерительных пакетов к чувствительному элементу осуществляется посредством сварки. При измерении температуры измерительные пакеты вставляются в защитный чехол ТС, предохраняющий их от повреждений и загрязнений. Внутреннее пространство чехла засыпается ингибиторным порошком.

Требования, предъявляемые к точности измерения температуры при проведении исследовательских работ, высокие. Требование высокой точности обуславливает необходимость создания соответствующих

конструкций ТС, обеспечивающих необходимую точность показаний в условиях эксперимента. В народном хозяйстве необходимо измерять температуру в более жестких условиях, где требования к точности измерения не являются решающими. Для измерения температуры в условиях механической вибрации и термической нагрузки созданы конструкции ТС повышенной механической прочности.

Учитывая опыт эксплуатации выпускаемых ТС представляется возможным разделить технические ТС на следующие укрупненные группы:

общепромышленные ТС для измерения температуры в различных отраслях народного хозяйства;

ТС для измерения температуры в условиях с повышенными механическими нагрузками;

ТС во взрывобезопасном исполнении для измерения температуры в средах различных категорий взрывоопасности;

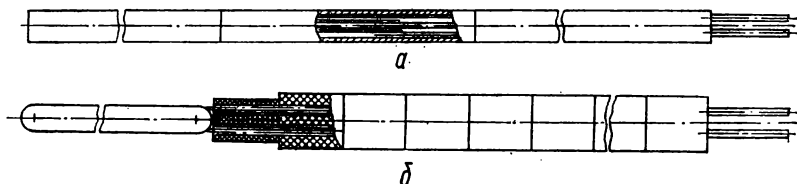


Рис. 7.8. Конструкция измерительного пакета:

а — медного; *б* — платинового.

ТС для измерения температуры в атомных и энергетических установках;

ТС для измерения температуры поверхностей вращающихся объектов;

ТС для измерения температуры поверхностей неподвижных твердых тел;

ТС для измерения температуры в помещениях;

ТС для измерения температуры в криогенной технике;

ТС для измерения температуры зерна;

ТС с унифицированным выходным сигналом 0—5 мА для измерения температуры в различных отраслях промышленности.

Основные требования, предъявляемые к техническим ТС: взаимозаменяемость, простота и надежность в работе. Типы и основные характеристики ТС, серийно выпускаемых промышленностью СССР, приведены в табл. 7.6.

В зависимости от условий эксплуатации для изготовления несущей и защитной арматуры применяются стекло, кварц, огнеупорные, газоплотные, керамические материалы. Внешний кожух для образцовых ТС выполняется из платины, а для технических — из нержавеющей сталей. Почти все образцовые ТС имеют газонепроницаемую защитную арматуру, внутренняя полость которой предварительно вакуумируется с нагреванием до 450 °С, затем заполняется сухим газом и герметизируется. Для заполнения арматуры применяется гелий, аргон, азот или сухой воздух. Для защиты платины от возможного загрязнения другими металлами в газовое заполнение ТС добавляется 5—10 % кислорода.

Внутреннее пространство защитной арматуры из нержавеющей сталей технических платиновых ТС заполняется отожденным по-

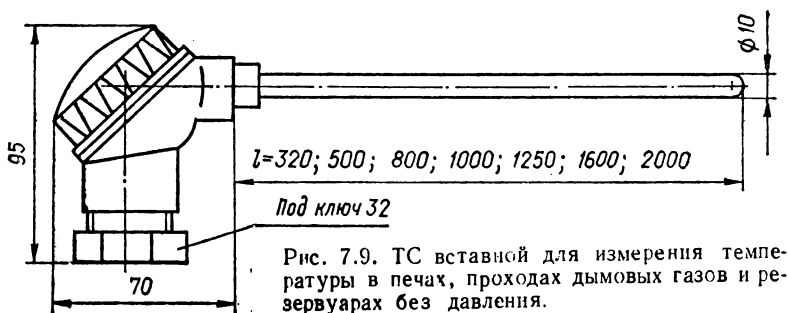


Рис. 7.9. ТС вставной для измерения температуры в печах, проходах дымовых газов и резервуарах без давления.

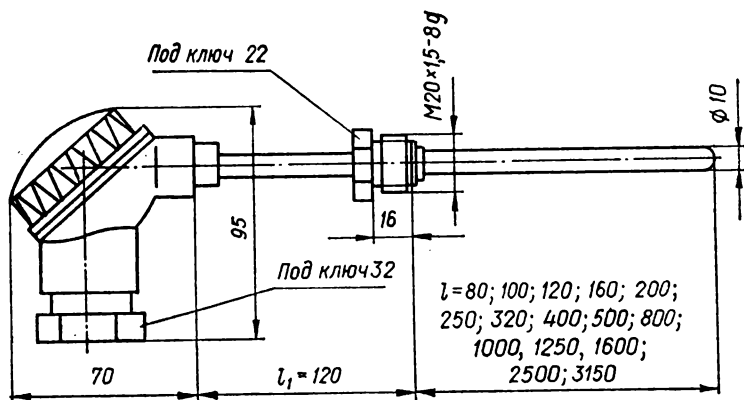


Рис. 7.10. ТС с плавающим штуцером с резьбой M20×1,5 для низких давлений.

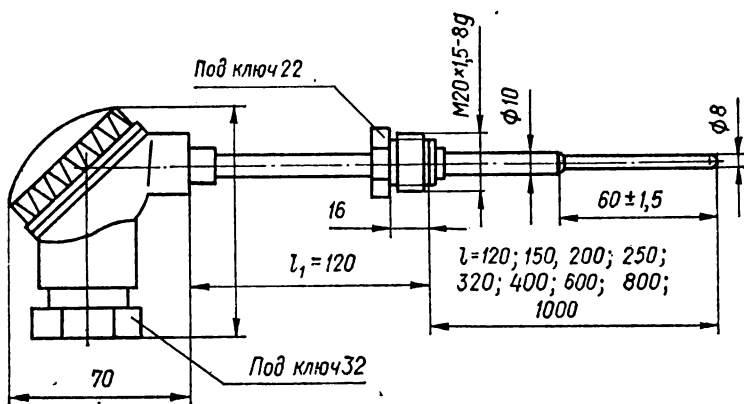


Рис. 7.11. ТС с плавающим штуцером с резьбой M20×1,5 малонерционный.

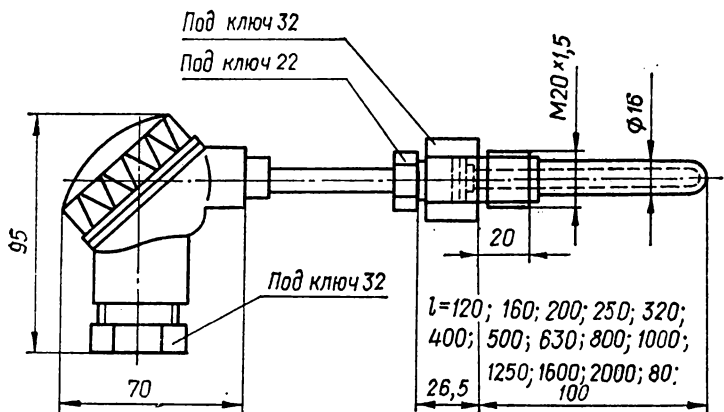


Рис. 7.12. ТС с технологической защитной гильзой с резьбой $M20 \times 1,5$ для средних давлений.

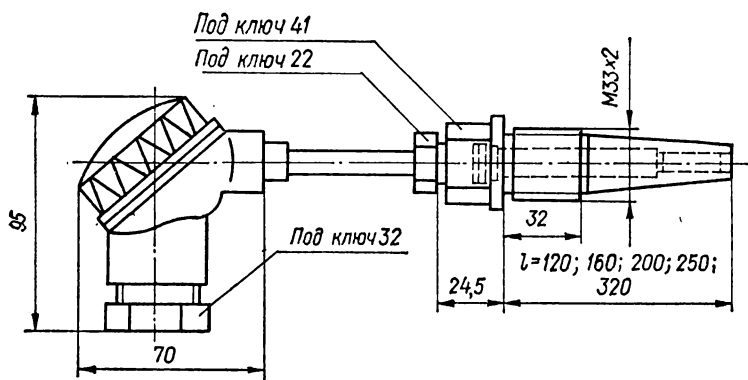


Рис. 7.13. ТС с технологической защитной гильзой с резьбой $M33 \times 2$ для высоких давлений.

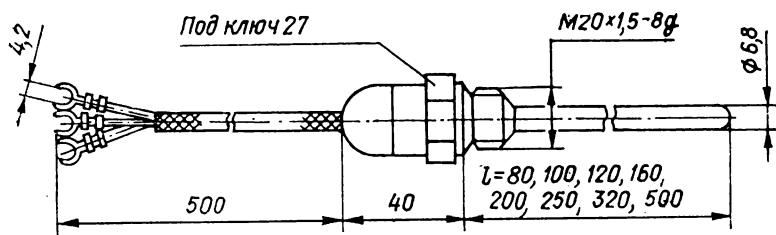


Рис. 7.14. ТС с неподвижным штуцером с резьбой $M20 \times 1,5$ с выводным кабелем для низких давлений.

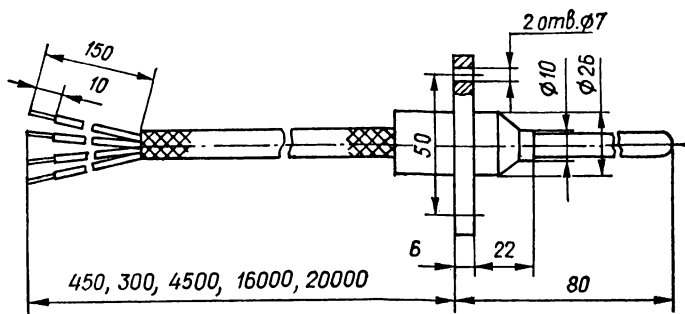


Рис. 7.15. ТГ фланцевый для измерения температуры в грузовых помещениях изотермических вагонов железнодорожного транспорта.

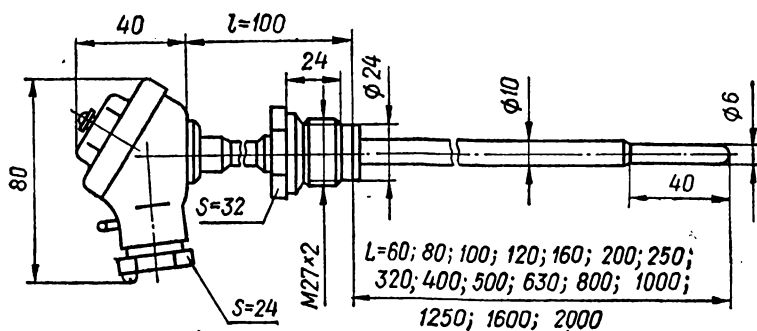


Рис. 7.16. ТГ с плавающим штуцером с резьбой М27×2 для условий с повышенными механическими нагрузками и низких давлений.

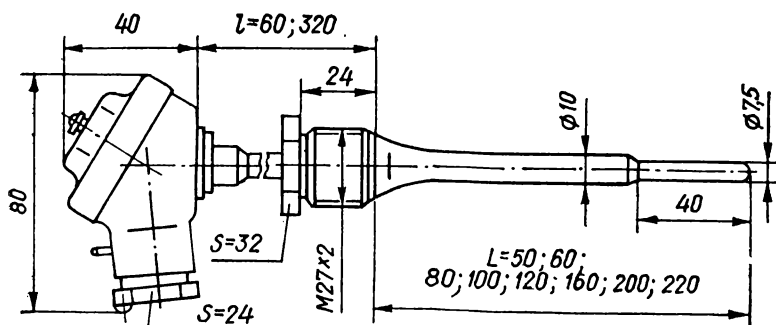


Рис. 7.17. ТГ с неподвижным штуцером с резьбой М27×2 для условий с повышенными механическими нагрузками и низких давлений.

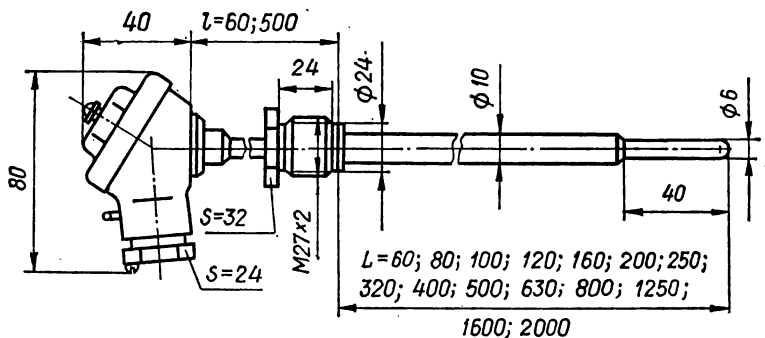


Рис. 7.18. ТС с плавающим штуцером с резьбой $M27 \times 2$ для условий с повышенными механическими нагрузками и средних давлений.

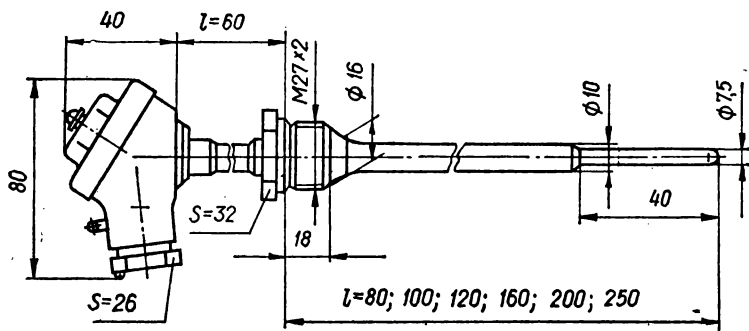


Рис. 7.19. ТС с неподвижным штуцером с резьбой $M27 \times 2$ для условий с повышенными механическими нагрузками и средних давлений.

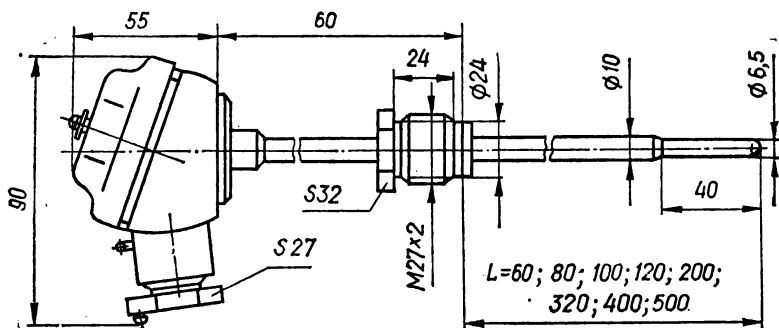


Рис. 7.20. ТС с плавающим штуцером с резьбой $M27 \times 2$ для условий с повышенными механическими нагрузками и низких давлений.

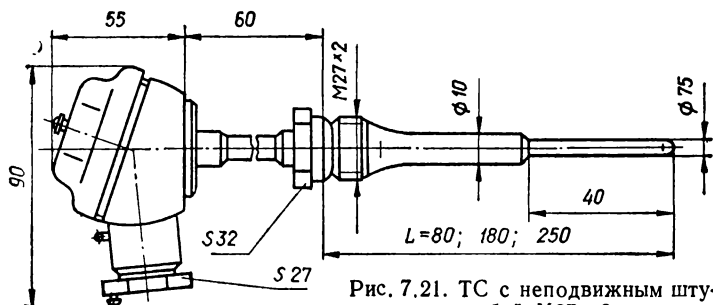


Рис. 7.21. ТС с неподвижным штуцером с резьбой $M27 \times 2$ для условий с повышенными механическими нагрузками и средних давлений.

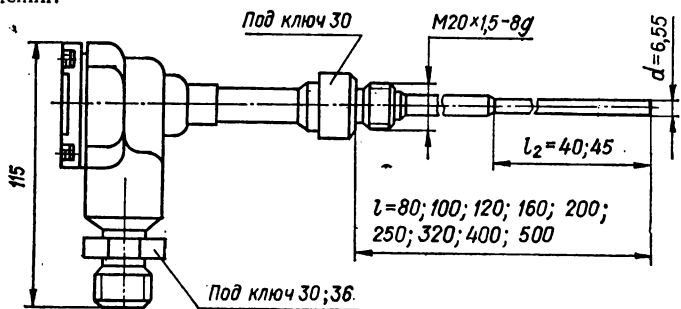


Рис. 7.22. ТС во взрывобезопасном исполнении с неподвижным штуцером с резьбой $M20 \times 1,5$ для измерения температуры помещений, в которых по условиям работы могут образовываться взрывоопасные смеси газов и паров с воздухом (1, 2, 3 — категории групп T_1, T_2, T_3, T_4 по уровню взрывозащиты «РВ — IВ» и «ВЗТ4 — В»).

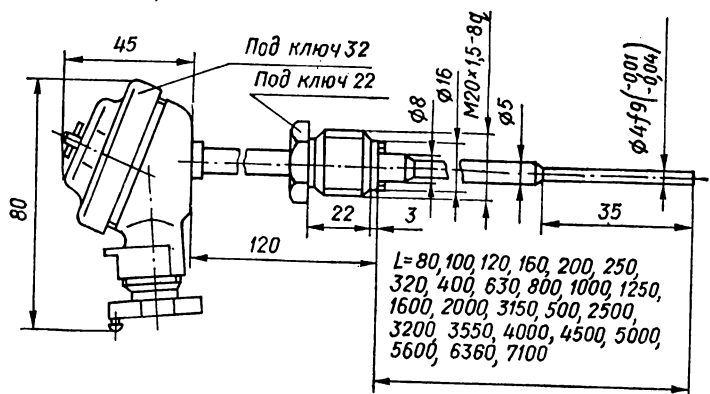


Рис. 7.23. ТС с плавающим штуцером с резьбой $M20 \times 1,5$ для измерения температуры воды, бетонной защиты и металлоконструкции реактора.

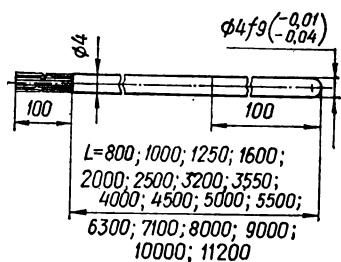


Рис. 7.24. ТС вставной для измерения температуры воды, бетонной защиты и металлоконструкции реактора.

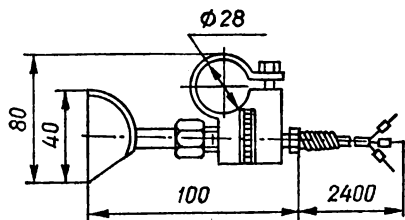


Рис. 7.25. ТС для длительного и непрерывного измерения температуры поверхности сушильных цилиндров бумагоделательных машин, вращающихся с линейной скоростью до 100 м/мин при температуре окружающего воздуха от 30 до 70 °С.

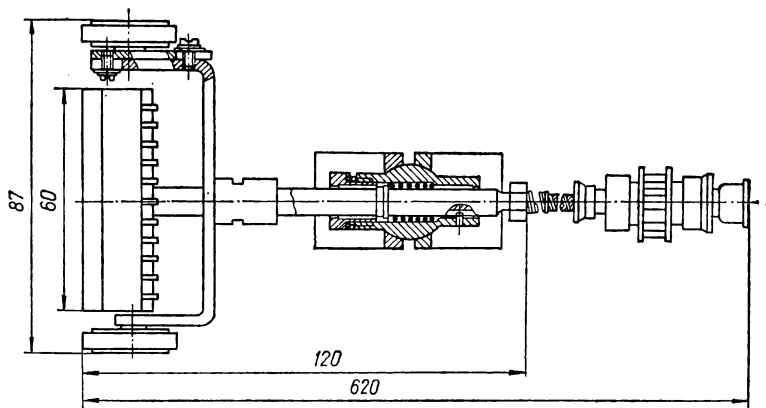
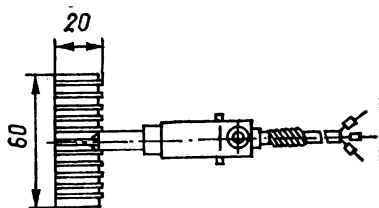


Рис. 7.26. ТС для стационарного измерения температуры поверхности валков каландров диаметром 500 мм и более, вращающихся с линейной скоростью до 200 м/мин.

Рис. 7.27. ТС для непрерывного измерения температуры поверхности металлических валков диаметром 250 ± 20 мм, вращающихся с линейной скоростью до 200 м/мин.

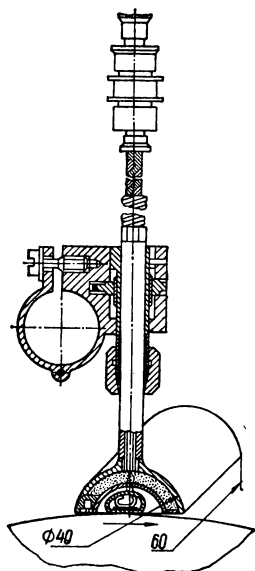


Рис. 7.28. ТС с подвижным штуцером с резьбой $M12 \times 1,5$ с кабельным выводом для измерения температуры подшипников в среде турбинных масел.

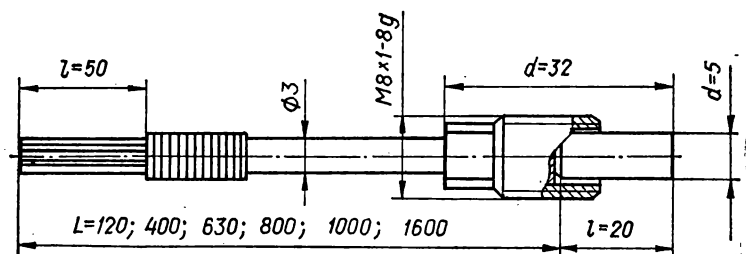
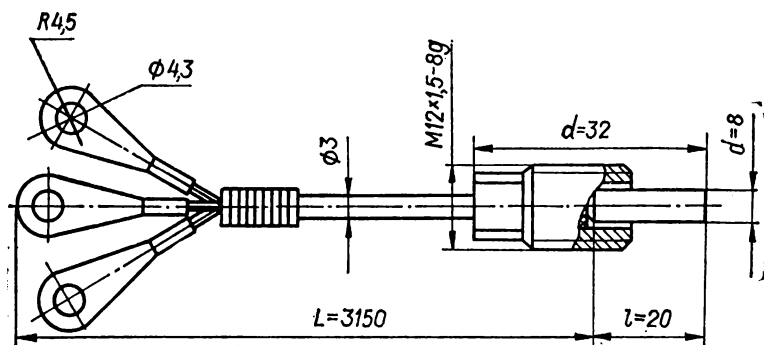


Рис. 7.29. ТС с подвижным штуцером с резьбой $M8 \times 1$ с кабельным выводом для измерения температуры подшипников в среде турбинных масел.

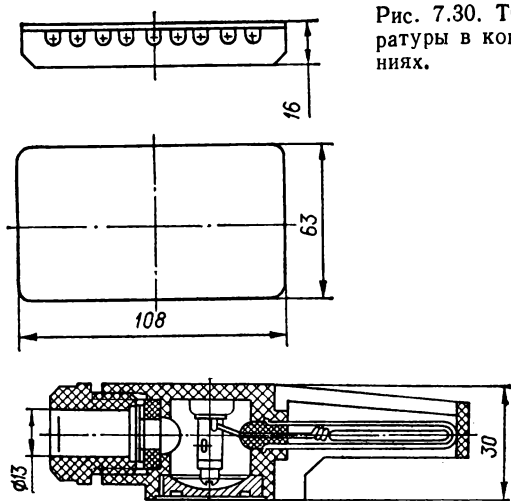


Рис. 7.30. ТС для измерения температуры в кондиционируемых помещениях.

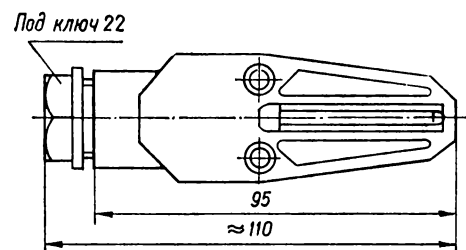


Рис. 7.31. ТС для измерения температуры в условиях свободной конвекции воздуха.

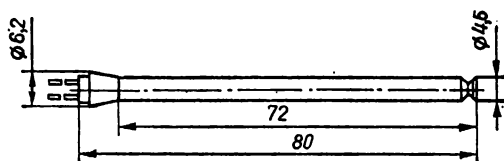


Рис. 7.32. ТС для измерения низких температур поверхностей трубопроводов в условиях вакуума $133,32 \times 10^{-10}$ Па ($1 \cdot 10^{-10}$ мм рт. ст.).

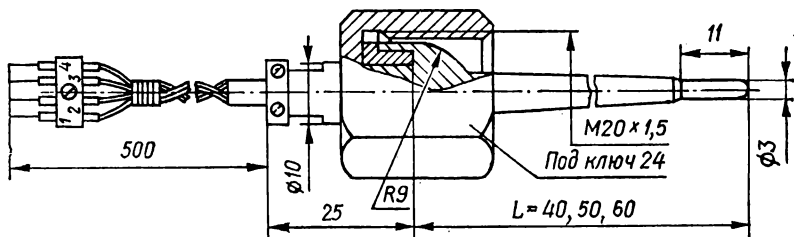


Рис. 7.33. ТС с накидной гайкой с резьбой $M20 \times 1,5$ для измерения температуры в криогенных системах.

Рис. 7.34. ТС с подвижным штуцером с резьбой $M20 \times 1,5$ для измерения температуры в криогенных системах.

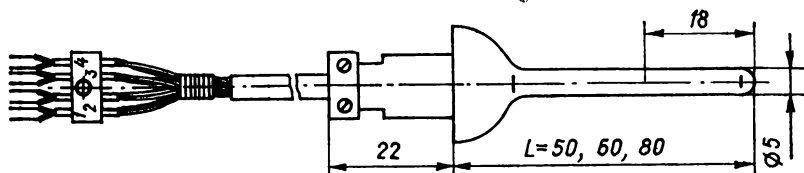
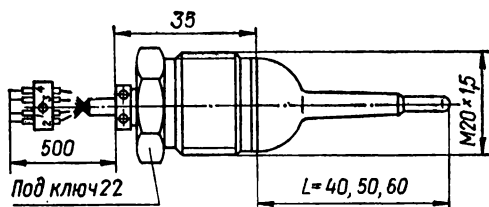


Рис. 7.35. ТС для измерения температуры в криогенных системах.

Рис. 7.36. ТС с неподвижным штуцером с резьбой $M16 \times 1$ для измерения температуры в криогенных системах.

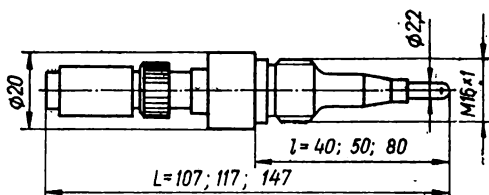


Рис. 7.37. ТС переносной для измерения температуры зерна.

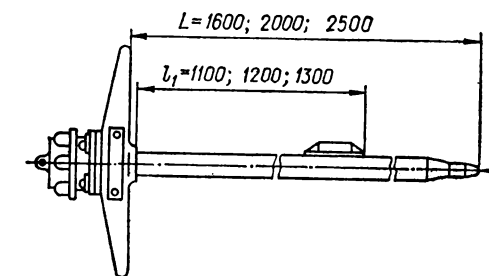
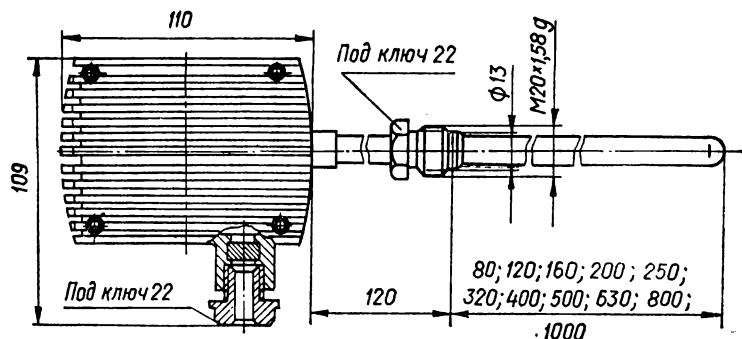


Рис. 7.38. ТС с унифицированным выходным сигналом 0—5 мА с плавающим штуцером с резьбой $M20 \times 1,5$ для низких давлений.



Т а б л и ц а 7.6. Основные характеристики ТС, серийно выпускаемых

Номер рисунка	Тип	Номинальная статическая ха- рактеристика (ГОСТ 6651—78)	Количе- ство чув- ствитель- ных эле- ментов	Диапазон измеряемых температур, °С	
				от	до
7.9	ТСП-0879	50 П; 100 П	1	—260	+600
		50 П; 100 П	2		
7.10	ТСМ-0879	50 М; 100 М	1	—50	+200
	ТСП-0879	50 П; 100 П	1	—260	+600
		50 П; 100 П	2		
	ТСМ-0879	50 М; 100 М	1	—50	+200
7.11	ТСП-0879	50 П; 100 П	1	—260	+600
		50 П; 100 П	2		
7.12	ТСМ-0879	50 М; 100 М	1	—50	+200
	ТСП-0879	50 П; 100 П	1	—260	+600
		50 П; 100 П	2		
	ТСМ-0879	50 М; 100 М	1	—50	+200
7.13	ТСП-0879	50 П; 100 П	1	—260	+600
		50 П; 100 П	2		
7.14	ТСМ-0879	50 М; 100 М	1	—50	+200
	ТСП-0879	50 П; 100 П	1	—50	+250
7.15	ТСМ-0879	50 М; 100 М	1	—50	+200
	ТСП-0879	100 П	1	—50	+60

промышленностью СССР

Материал защитной арматуры (диаметр \times толщина стенки, мм)	Условное давление, МПа (кгс/см ²) (ГОСТ 356—68)	Материал соединительной головки, штуцер	Показатель тепловой инерции, с (ГОСТ 6651—78)
Сталь 08X13; 12X18H10T; X23Ю5; 10 \times 1 (ГОСТ 9941—72) То же	0,4 (4)	Пластмасса; штуцер с резьбой М27 \times 1,5 под кабель с $d_{\max} = 16$ мм*	≤ 40
»	0,4 (4)	То же	≤ 40
»	6,4 (64)	»	≤ 40
»	6,4 (64)	»	≤ 40
Сталь 08X13; 12X18H10T; X23Ю5; 10 \times 1 (ГОСТ 9941—72) То же	6,4 (64)	Пластмасса; штуцер с резьбой М27 \times 1,5 под кабель с $d_{\max} = 16$ мм	≤ 20
То же	6,4 (64)	То же	≤ 20
Защитная гильза из стали 08X13; 12X18H10T; 16 \times 2 (ГОСТ 9941—72) То же	25 (250)	—	≤ 60
То же	25 (250)	—	≤ 60
Защитная гильза из стали 08X13; 12X18H10T; коническая (ГОСТ 5949—75) То же	50 (500)	—	≤ 40
То же	50 (500)	—	≤ 40
Сталь 08X13; 12X18H10T; 8 \times 0,8 (ГОСТ 9941—72) То же	0,4 (4)	Без соединительной головки, со специальной заделкой трехпроводного кабеля длиной до 5 м	≤ 20
То же	4 (40)	То же	≤ 20
Сталь 12X18H10T; 6 \times 0,5 (ГОСТ 9941—72)	0,4 (4)	Без соединительной головки, со специальной заделкой четырехпроводного кабеля длиной до 15 м	≤ 15

Номер рисунка	Тип	Номинальная статическая ха- рактеристика (ГОСТ 6651—78)	Количе- ство чув- ствитель- ных эле- ментов	Диапазон измеряемых температур, °С	
				от	до
7.16	ТСП-8040 П	50 П; 100 П	1	—200	+500
		50 П	2	—50	+300
				—50	+150
7.17	ТСП-8040П	50 П; 100 П	1	—50	+400
		50 П	2	—50	+400
7.18	ТСП-8040П	50 П; 100 П	1	—200	+500
		50 П	2	—50	+300
				—50	+150
7.19	ТСП-8040П	50 П; 100 П	1	—250	+500
		50 П	2	—50	+300

Продолжение табл. 7.6

Материал защитной арматуры (диаметр \times толщина стенки, мм)	Условное давление, МПа (кгс/см ²) (ГОСТ 356—68)	Материал соединительной головки, штуцер	Показатель тепловой инерции, с (ГОСТ 6651—78)
Сталь 08X18H10T 10 \times 2 (ГОСТ 9941—72)	16 (160)	Сталь; штуцер с резьбой М20 \times 1,5, под кабель с $d_{\max} = 16$ мм	6
Сплав 3М; 10 \times 2 (ТУ 1-5-021—72)	10 (100)	Сталь; 2 штуцера с резьбой М20 \times 1,5 под кабель с $d_{\max} = 16$ мм	6
Бр-АЖНМц 9-1-4-1 (ТУ-48-21-249—72)	6,4 (64)	То же	6
Сталь 08X18H10T; 10 \times 2 (ГОСТ 9941—72)	25 (250)	Сталь; штуцер с резьбой М20 \times 1,5 под кабель с $d_{\max} = 16$ мм	6,5
То же	То же	Сталь; 2 штуцера с резьбой М20 \times 1,5 под кабель с $d_{\max} = 16$ мм	6,5
Сталь 08X18H10T (ГОСТ 5949—75)	25 (250)	Сталь; штуцер с резьбой М20 \times 1,5 под кабель с $d_{\max} = 16$ мм	9
Сплав 3М (ТУ1-5-021—72)	25 (250)	Сталь; 2 штуцера с резьбой М20 \times 1,5 под кабель с $d_{\max} = 16$ мм	9
Бронза Бр-АЖНМц 9-4-4-1 (ТУ 48-21-249—72)	10 (100)	То же	9
Сталь 08X18H10T (ГОСТ 5949—75)	25 (250)	Сталь; штуцер с резьбой М20 \times 1,5 под кабель с $d_{\max} = 16$ мм	9
Сплав 3 М (ТУ 1-5-021—72)	25 (250)	Сталь; 2 штуцера с резьбой М20 \times 1,5 под кабель с $d_{\max} = 16$ мм	9

Номер рисунка	Тип	Номинальная статическая ха- рактеристика (ГОСТ 6651—78)	Количе- ство чув- ствитель- ных эле- ментов	Диапазон измеряемых температур, °С	
				от	до
				—50	+150
7.20	ТСП-8040П	100 П	1	—4	+45
7.21	ТСП-8040П	50 П; 100 П	1	0	530
7.22	ТСП-5081-01	Гр. 21; 100 П	1	—50	+200
7.23	ТСП-8053	Гр. 21	1	—50	+400
7.24	ТСП-8054	Гр. 22	2	—50	+400
		Гр. 21	1	—50	400
7.25	ДТВ-038	Гр. 23	1	30	150
7.26	ДТВ-061	Гр. 23	1	30	150
7.27	ДТВ-040	Гр. 21	1	30	300

Продолжение табл. 7.6

Материал защитной арматуры (диаметр \times толщина стенки, мм)	Условное давление, МПа (кгс/см ²) (ГОСТ 356—68)	Материал соединительной головки, штуцер	Показатель тепловой инерции, с (ГОСТ 6651—78)
Бронза Бр-АЖНМц 9-4-4-1; (ТУ-48-21-249—72)	10 (100)	Сталь; 2 штуцера с резьбой М20 \times 1,5 под кабель с $d_{\text{max}} = 16$ мм	9
Сплав 3М; 10 \times 2 (ТУ 1-5-021—72)	10 (100)	Сталь; штуцер с резьбой М24 \times 1,5 под кабель с $d_{\text{max}} = 19,5$ мм	6,5
Сталь 08Х18Н10Т; коническая (ГОСТ 5949—75)	25 (250)	Сталь; штуцер с резьбой М24 \times 1,5 под кабель с $d_{\text{max}} = 19,5$ мм	9
Сталь 08Х13; 12Х18Н10Т; 08Х17Н16МЗТ; 8 \times 0,8 (ГОСТ 9941—72) и сплав ВТ1-0; 8 \times 0,8 (ОСТ 1.90050—72)	32 (320)	Пластмасса; штуцер с резьбой 1" и 3/4" трубной под кабель с $d_{\text{max}} = 13$ мм	9
Сталь 08Х18Н10Т; 4 \times 0,3 (ГОСТ 10498—63)	18 (180)	Сталь; штуцер с резьбой М 20 \times 1,5 под кабель с $d_{\text{max}} = 12$ мм	≤ 7
То же	18 (180)	То же	≤ 7
Сталь 08Х18Н10Т; 4 \times 0,3 (ГОСТ 10498—63)	18 (180)	Без соединительной головки	≤ 7
Защитный корпус из пластмассы	Негерметичный со стороны извлекаемой среды	Без соединительной головки, со специальной заделкой выводных проводников. Крепится при помощи цангового зажима	≤ 30
То же	То же	То же	25
Сталь 12Х18Н10Т (ГОСТ 9941—72)	»	Без соединительной головки, со специальной заделкой выводных проводников. Крепится при помощи специального механизма крепления	≤ 30

Номер рисунка	Тип	Номинальная статическая ха- рактеристика (ГОСТ 6651—78)	Количе- ство чув- ствитель- ных эле- ментов	Диапазон измеряемых температур, °С	
				от	до
7.28	ТСП-0979	50 П	1	0	120
	ТСМ-0979	50 М	1	0	120
7.29	ТСП-0979	50 П	1	0	120
	ТСМ-0979	50 М	1	0	120
7.30	ТСП-1079	100 П	1	0	50
	ТСМ-1079	50 М	2	0	50
7.31	ТСМ-6114	Гр. 23	1	—50	+100
7.32	ТСП-4054	100 П	1	—260	+250
7.33	ТСП-4050	100 П	1	—26	+120

Продолжение табл. 7.6

Материал защитной арматуры (диаметр \times толщина стенки, мм)	Условное давление, МПа (кгс/см ²) (ГОСТ 356—68)	Материал соединительной головки, штуцер	Показатель тепловой инерции, с (ГОСТ 6651—78)
Латунь Л-63 8 \times 0,5 (ГОСТ 15527—70)	0,4 (4)	Без соединительной головки, со специальной заделкой выводных проводников	≤ 9
То же	0,4 (4)	То же	≤ 9
Латунь Л-63 5 \times 0,2 (ГОСТ 15527—70)	0,4 (4)	Без соединительной головки, со специальной заделкой выводных проводников	≤ 9
То же	0,4 (4)	То же	≤ 9
Сталь 20 и пресс-материал	Негерметичный со стороны измеряемой среды	Без соединительной головки. Крепится при помощи винтов М3	≤ 40
То же	То же	То же	≤ 40
Латунь Л-96 (ГОСТ 15527—70)	»	Пластмасса; штуцер с резьбой М 20 \times 1,5 под кабель с $d_{\max} = 13$ мм Крепится при помощи винтов М4	≤ 25
Медь МБ-А диаметром 4,5 мм (ГОСТ 617—72)	Герметичный со стороны измеряемой среды	Без соединительной головки, со специальной заделкой выводных проводников Крепится при помощи прижимов или пайки	≤ 9
Сталь 12Х18Н10Т; коническая (ГОСТ 5949—75)	25 (250)	Без соединительной головки, со специальной заделкой выводных проводников	≤ 2

Номер рисунок	Тип	Номинальная статическая характеристика (ГОСТ 6651—78)	Количество чувствительных элементов	Диапазон измеряемых температур, °С	
				от	до
7.34	ТСП-4050-01	100 П	1	—260	+120
7.35	ТСП-4050-02	100 П	2	—260	+120
7.36	ТСФГ-021-01	Индивидуальная	1	4,2	350 К
7.37	ТСМ-8034М	Гр. 23	1	—50	+85
7.38	ТСПУ-1179**	0,5 мА (100 П)	1	0 0 0 0	100 200 400 500

* d_{max} — максимальный диаметр кабеля.

** ТСПУ-1179 изготавливается также с технологическими защитными гильзами условное давление 25 МПа (250 кгс/см²) и 50 МПа (500 кгс/см²) соответственно.

рошом окиси алюминия с примесью ингибиторов. В верхней части внутреннее пространство защитной арматуры отделяется от окружающей среды пробкой из огнеупорной массы. Материал защитной арматуры выбирается в зависимости от диапазона измеряемых температур и агрессивности измеряемой среды объекта.

7.4. Полупроводниковые ТС

Терморезисторные характеристики полупроводников значительно различаются между собой. Поэтому обобщение их в одном структурном подразделении носит условный характер. Для всех полупроводников характерна высокая чувствительность. ТКС большинства термо-

Продолжение табл. 7.6

Материал защитной арматуры (диаметр \times толщина стенки, мм)	Условное давление, МПа (кгс/см ²) (ГОСТ 356—68)	Материал соединительной головки, штуцер	Показатель тепловой инерции, с (ГОСТ 6651—78)
Сталь 12Х18Н10Т; коническая (ГОСТ 5949—75)	25 (250)	Без соединительной головки, со специальной заделкой выводных проводников	≤ 2
Сталь 12Х18Н10Т диаметром 5 мм (ГОСТ 5949—75) и сплав НМЖМц-28-2, 5-1,5 диаметром 5 мм (ГОСТ 15527—70)	25 (250)	Без соединительной головки, со специальной заделкой кабеля	≤ 9
Сталь 12Х18Н10Т (ГОСТ 5949—75)	60 (600)	То же	≤ 3
Сталь 08Х13; 20 \times 2 (ГОСТ 9941—72). Выдерживает статическую нагрузку вдоль оси не менее 75 кг	—	Без соединительной головки, со специальной заделкой выводных проводников в штупсельном разьеме	30
Сталь 08Х13; 12Х18Н10Т; 10 \times 1 (ГОСТ 9941—72)	6,4 (64)	Силумин; штуцер с резьбой М 20 \times 1,5 под кабель с $d_{\text{max}} = 13$ мм	≤ 20

с резьбами М 20 \times 1,5 и М 33 \times ? (аналогично приведенным на рис. 7.12 и 7.13). показатель тепловой инерции 60 с.

резисторных полупроводников на порядок, а для некоторых материалов в экстремальных условиях — на два порядка больше соответствующего среднего значения для металлов.

Целесообразно разделить полупроводники, используемые при измерении низких температур, на материалы, обладающие отрицательным ТКС, — термисторы; материалы, обладающие положительным ТКС, — позисторы. Все полупроводниковые ТС имеют сравнительно небольшой срок применения, поэтому они не вошли в номенклатуру приборов, используемых в метрологии.

При измерении низких температур вблизи 0 К наиболее часто используются германий и кремний, обладающие термисторной чувствительностью (см. рис. 7.1, кривая 2). С уменьшением температуры растет не только само сопротивление, но и производная — коэффи-

циент сопротивления. Сопротивление чистых германия и кремния увеличивается настолько интенсивно, что в тройной точке водорода (13,81 К) оно так велико, что материал практически становится изолятором. Поэтому чистые материалы можно использовать для измерений температур выше 20 К.

Для более низких температур необходимо легирование мышьяком, индием, сурьмой, галлием из расчета добавки примерно 10^{17} легирующих атомов на 1 см^3 . Полученный таким образом кристалл размерами 1 мм^3 при 10 К имеет сопротивление 14 Ом и при 1 К — 216 Ом. При температуре около 4 К воспроизводимость легированного германия оценивается в 10^{-3} К.

Несмотря на большую нелинейность зависимости сопротивления от температуры, германиевые ТС находят широкое применение для измерений в диапазоне от 0,5 до 12 К, поскольку другие виды ТС имеют еще большую нелинейность.

Угльные элементы по характеру проводимости занимают промежуточное положение между металлами и полупроводниками, обладают большим отрицательным ТКС и эффективно применяются в качестве чувствительных элементов при измерениях низких температур. Углеродистые сопротивления наносятся на изоляционную подложку методом вжигания или пиролиза. Сопротивление полученной тонкой пленки существенно зависит от состояния свободной поверхности. Поэтому поверхность должна быть тщательно обработана и защищена изоляционным покрытием, например методом вакуумного напыления.

В связи с эффективным применением углепластиков в машиностроении значительно усовершенствовалась технология получения углеродистых волокон. Нити таких волокон широко используются для изготовления чувствительных элементов ТС, которые применяются для измерения температур, начиная от 0,1 К. Верхний предел ограничен возможностью начала окисления углерода при температуре, превышающей 900 К, и сублимации при температуре выше 2800 К. Большие конструктивные трудности связаны с контактами переходов от неметаллического углерода к металлическим проводам.

Термисторные промышленные ТС. Благодаря высокой чувствительности термисторные ТС эффективно применяются для измерения температур в диапазоне от 170 до 570 К.

Термисторы изготавливаются на основе оксидных материалов, например из твердого раствора Fe_2O_3 в материалах кристаллической структуры типа шпинель Zn_2TiO_4 , MgTiO_4 или MgCzO_4 . Для идентичности изделий с целью получения требуемого значения сопротивления добавляют стабилизирующие вещества: окись никеля, окись углерода, окись магния и др. При помощи пластичного связующего вещества методом прессования смеси придается необходимая форма (сферическая, цилиндрическая, дисковая). Форма изделия определяется условиями работы, для которых оно предназначено. Опрессованная в форме заготовка совместно с выводами подвергается спеканию.

Для измерения температуры поверхности применяются термисторы в виде плоской шайбы, тонкого диска или бусинки небольшого диаметра. Бусиновый терморезистор диаметром 0,5 мм, покрытый глазурью, в спокойном воздухе имеет показатель тепловой инерции 0,3 с. Типичные конструкции термисторных ТС приведены на рис. 7.39—7.42.

Воспроизводимость ТС на базе терморезистора, состаренного в течение длительного времени, при измерении температуры в диапазоне от -40 до 180°C составляет $\pm 0,2$ К. В качестве защитной armатуры ТС применяются тонкостенные трубки из стекла и нержавеющей стали, обеспечивающие тепловой контакт с терморезистором.

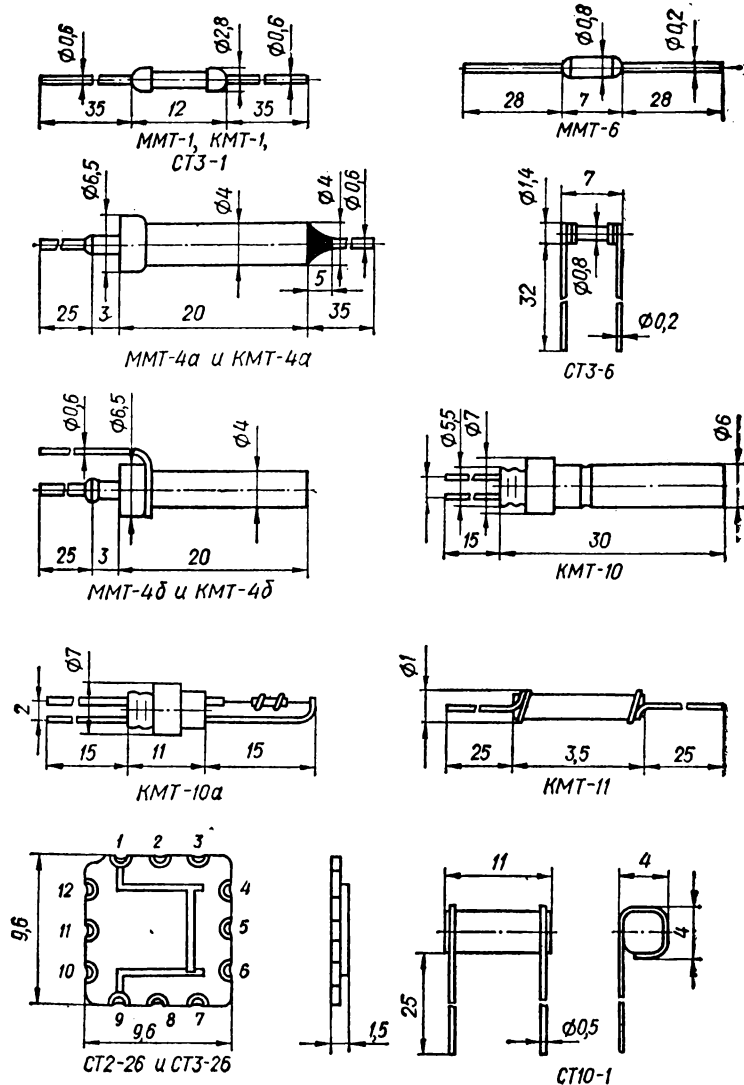


Рис. 7.39. Конструктивное исполнение стержневых ПС прямого подогрева, выпускаемых промышленностью.

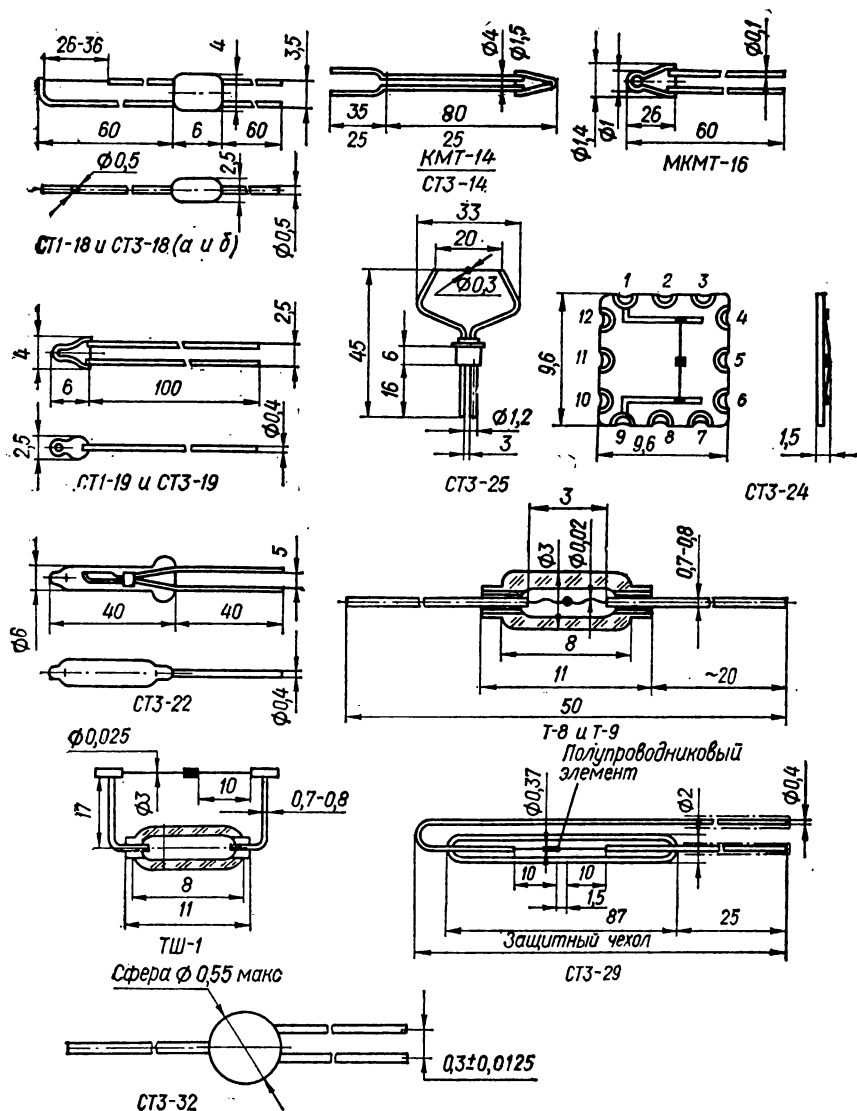


Рис. 7.40. Конструктивное исполнение буси́нковых ПС прямого подогрева, выпускаемых промышленностью.

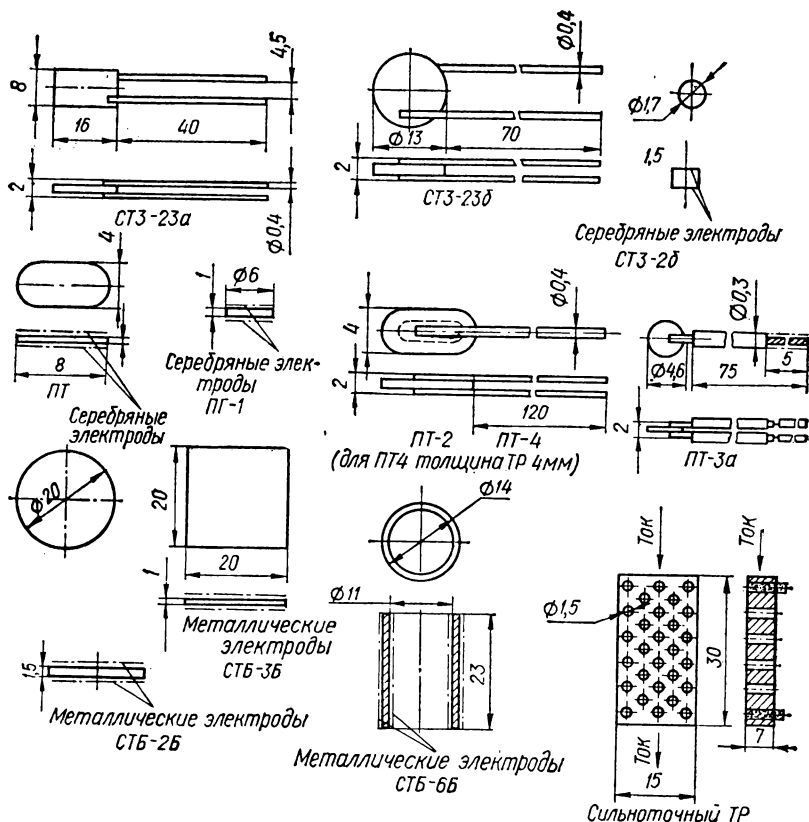


Рис. 7.41. Конструктивное исполнение дисковых, пластинчатых, трубчатых ПС прямого подогрева, выпускаемых промышленностью.

ПС КМТ, СТ1 и ПТ изготавливаются на основе кобальтомарганцевых, ММТ и СТ2 — на основе медно-марганцевых, СТЗ и МКМТ — медно-кобальтомарганцевых и СТ4 — никелево-кобальтомарганцевых оксидных полупроводников, СТ5 — на основе титаната бария, легированного 0,1 % по массе Ge, СТ6 — на основе легированных твердых растворов в системе $\text{BaTiO}_3 - \text{BaSnO}_3$, СТ10 — на основе системы $\text{BaSr} - \text{TiSiO}_3$, легированной церием.

Основные характеристики большинства технических типов ПС с отрицательным ТКС прямого подогрева, применяемых в качестве чувствительных элементов, приведены в табл. 7.7, а условия их эксплуатации — в табл. 7.8. В ТС в основном применяются ПС следующих типов: ММТ-1, ММТ-4, КМТ-1, КМТ-4 и СТЗ-1 (см. рис. 7.39).

Серийные полупроводниковые ТС не обладают высокой стабильностью характеристик. В процессе эксплуатации через $(2...5) \cdot 10^3$ ч большинство из них приобретает свойства, которые в дальнейшем изменяются мало. На рис. 7.43 показан ход изменения добавочного со-

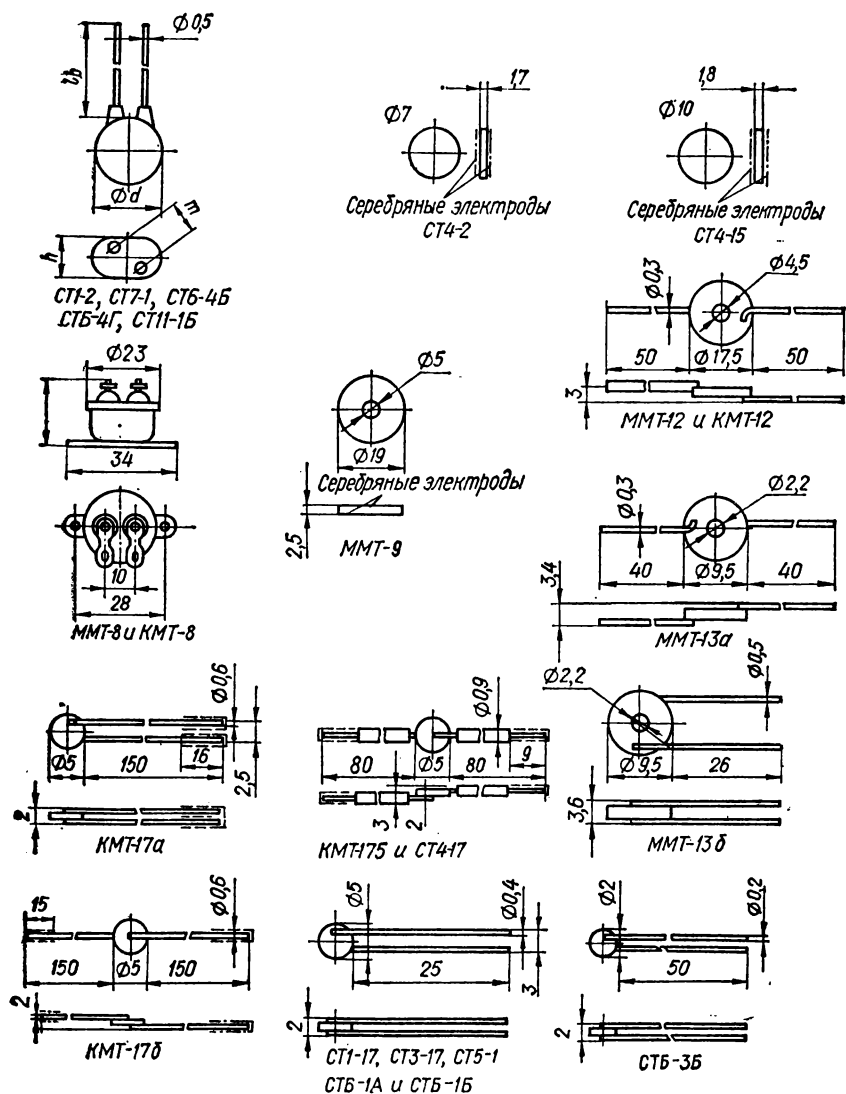


Рис. 7.42. Конструктивное исполнение дисковых ПС прямого подогрева, выпускаемых промышленностью.

противления, получаемого в процессе эксплуатации. Кривые построены по средним данным для партии в 10—15 шт. Разброс индивидуальных характеристик в несколько раз превышает показанные на рис. 7.43. Технология искусственного старения, стабилизации и унификации свойств термисторных ТС пока еще не нашла в промышленности эффективных решений. Из стержневых транзисторных ТС наименьшим разбросом по параметрам отличаются СТЗ-1 и СТЗ-6.

Для контроля и регулирования температуры применяются бусиновые ПС (см. рис. 7.40). Кобальтомарганцевые бусиновые ПС, герметизированные в стекле, применяются в ТС для измерения температуры до 300 °С. ПС типа СТ1-18 и СТЗ-18 приваривают к специальным траверсам для исключения возможности изменения номинальной статической характеристики при установке на объекте. ПС может быть отделено от траверсы. В этом случае соединение его с платиновыми

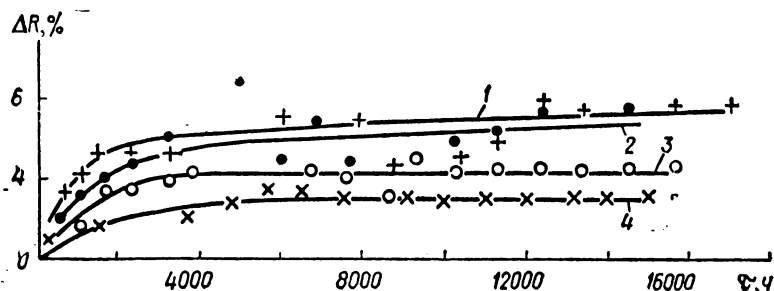


Рис. 7.43. Зависимость изменения сопротивления ПС типа ММТ-1 (2), ММТ-4 (3), КМТ-1 (1) и КМТ-4 (4) от времени прогрева при максимальных рабочих температурах (125 °С для ММТ-1, ММТ-4, КМТ-4 и 180 °С для КМТ-1).

проводами осуществляется приваркой контактных проводов или посредством специальных проводящих паст.

У ПС СТ1-19, СТЗ-19 и МКМТ-16 полупроводниковая бусинка герметизирована в миниатюрной капсуле. Миниатюрные бусиновые ПС типа МКМТ предназначены для измерения температуры живых организмов. На основе медно-кобальтомарганцевых оксидных полупроводников разработана серия полупроводниковых микросопротивлений ТС (типов МТ-54, МТ-5, МТ-57, МТ-58 и др.), предназначенных для измерения температуры ряда биологических объектов, в частности растений.

Температурная зависимость сопротивления терморезистора выражается уравнением $R = Ae^{B/T}$, где A и B — постоянные коэффициенты. Экспоненциальный характер этой зависимости затрудняет использование термисторных ТС в широком температурном интервале. ТС, предназначенные для комнатной температуры, непригодны для измерений при -100 °С или при 200 °С. Подбор ТС для измерений на требуемом уровне температур производят по значению коэффициента B : для измерений в диапазоне от «гелиевых» до «водородных» температур $B = 50...100$ К; от «водородных» до «азотных» $B = 100...300$ К; на уровне «кислородных» $B = 500...1500$ К.

Позисторные промышленные ТС. Позисторы также относятся к полупроводниковым ТС, но в отличие от термисторов имеют положительный термический ТКС. Чувствительные элементы позистор-

Таблица 7.7. Основные характеристики ПС с отрицательным ТКС

Тип	Преимущественная область применения	$R_{ном}$, КОМ при 20°C	$\pm \Delta R_{ном}$, % не более	Постоянная В, К	$-\alpha_T$, %/К при 20°C
Стерженьные					
КМТ-1	Измерение и регулирование температуры	22...1000*	20	3600...7200	4,2...8,4
ММТ-1		1...226*	20	2060...4300	2,4...5,0
СТ3-1		0,68...2,2*	10, 20	2870...3400	3,35...3,95
КМТ-4 (а и б)		22...1000*	20	3600...7200	4,2...8,4
ММТ-4 (а и б)		1...220*	20	2060...4300	2,4...5,0
СТ3-6	Тепловой контроль	6,8; 8,2	10	2050...2400 (От -28 до 125°C) 1200...1480 (От -90 до -28°C)	2,4...2,8
ММТ-6		10...100*	20	>2060	>2,4
КМТ-10		100...3300*	20	>3600	>4,2
КМТ-10а		100...3300*	20	>3600	>4,2
КМТ-11		1,0...100*	20	2060...4300	2,4...5,0
СТ2-26	Для микро- дулей	0,1...0,68*	20	2060...4300	2,4...5,0
Дискковые					
СТ1-2	Температурная компенсация, измерение и регулирование температуры	0,082; 0,091; 0,01; 0,011	5	3800...4200	4,4...4,9
СТ4-2	Измерение температуры авто- тракторных дви- гателей	2,1...3,0	—	3630...4210 (От 0 до 125°C) 3470...3630 (От -60 до 0°C)	4,2...4,8
СТ4-15	Температурная компенсация	0,88...1,12	10, 20	2930...3260 (От 0 до 155°C) 2350—2650 (От -60 до 0°C)	3,4...3,8
КМТ-8		0,1...10*		3000...7200	4,2...8,4
ММТ-8		0,001...1,0*		2060...3430	2,4...4,0
ММТ-9		0,01...4,7*		2060...4300	2,4...5,0
КМТ-12		0,1...10* 0,0047... ...1,0*		3600...7200 2060...3430	4,2...8,4 2,4...4,0
КМТ-13 (а и б)	Измерение и регулирование температуры	0,01...2,2*	20	2060...4300	2,4...5,0
КМТ-17 (а, б и в)		0,32...22*	10, 20	3600...6000	4,2...7,0
СТ1-17		0,3—22	10...20	3600...6000	4,2...7,0
СТ3-17		0,033; 0,047; 0,068; 0,01; 0,15; 0,22; 0,33	10 20	2580...3860	3,0...4,5
СТ4-17		1,5; 1,8 2,2	10	3260...3600	3,8...4,2

прямого подогрева

Диапазон измеряемой температуры, °С		Р _{макс.} мВт, не более		Н, мВт/К	G, мВт	τ, с, не более	Срок служ-бы, ч, не менее
от	до	при T _{ном}	T _{макс}				
ПС							
-60	180	1000	0,3	5	1	85	5000
-60	125	600	0,4	5	1,3	85	5000
-60	125	600	0,4	5	1,3	85	5000
-60	125	650	0,3	6	0,8	115	5000
-60	125	550	0,5	6	~1,6	115	5000
-90	125	150	0,2	1,6	0,6	35	5000
-60	125	50	0,1	1,7	0,3	35	5000
0	125	**	**	1	—	75	**
0	125	**	**	0,8	—	10	**
-60	125	—	—	—	—	—	5000
-60	125	—	—	—	—	—	5000
ПС							
-40	85	700	—	10—13	2—3	100	5000
-60	125	—	—	36	8	—	5000
-60	155	—	—	36	10	—	5000
-40	70	600	1	13	3	—	5000
-40	70	600	2	13	4	—	5000
-60	125	—	2	—	10	—	5000
-60	125	—	0,3	7	1,3	—	5000
-60	125	—	0,5	7	2,3	—	5000
-60	125	—	0,3	—	2	—	5000
-60 (КМТ-17 а, б)	155	500	0,1	2	0,5	30	3000
-60 (КМТ-17 в)	100	—	—	—	—	—	—
-60	100	500	0,1	2	0,5	30	3000
-60	100	500	0,2	3	0,8	30	5000
-80	100	500	0,1	2	0,5	30	5000

Тип	Преимущественная область применения	$R_{ном}$, кОм при 20°C	%, $\pm \Delta R_{ном}$, не более	Постоянная В, К	$-\alpha_T$, %/К при 20°C
СТЗ-23 (а и б)	Температурная компенсация	0,0022; 0,0027; 0,0033; 0,0039; 0,0047	10; 20	2600...3200	3,05...3,75
СТЗ-28	То же	0,15; 0,22; 0,33; 1,5; 2,2; 3	20	2580...3970	3,0...4,63
ПТ, ПТ-2 ПТ-1 ПТ-3 (а и б)	Измерение и регулирование температуры	0,08...0,4 0,4...0,9 0,4...0,9	20 — 20	3800...4100 3500...4400 3700...4100	4,4...4,8 4,1...5,1 4,3...1,8
ПТ-4 СТ7-1		0,6...0,8 0,001...0,01 при 20°C 1...600 при -196°C	— —	3500...4200 —	4,1...4,9 6,15
Бусянковые					
КМТ-14	Измерение и регулирование температуры	0,51; 0,91; 160; 200; 330; 4300; 7500 при 150°C	30	4100...7000	2,3...3,9 при 150°C
МКМТ-16 СТЗ-14		2,7; 5,1 1,5; 2,2	30 20	3260...3600 2750...3600 (От 5 до 125°C) 2600...3300 (От -60 до 5°C)	3,8...4,2 3,2...4,2
СТ1-18	То же	1,5; 2,2; 22; 33; 1500; 2200 при 150°C	20	4050...9000	2,25...5,0 при 150°C
СТЗ-18		0,68; 1,0; 1,5; 2,2; 3,3	20	4250...3520	2,6...4,1
СТ1-19		3,3; 4,7; 6,8; 10; 100; 150; 1500; 2200 при 150°C	20	4230...7200	2,35...4,0 при 150°C
СТЗ-19 СТЗ-22	Переменное сопротивление без подвижного контакта	2,2; 10; 15 1 при 25°C	20 30	2900...3850 2700...3700	3,4...4,5 3,05...4,15 при 25°C
СТЗ-24	Для микромодулей	0,68; 1,0; 1,5; 2,2; 3,3	20	2250...3520	2,6...4,1
СТЗ-25	Измерение и регулирование температуры	1,5; 2,2; 3,3	20	2600...3200	3,05...3,75

* Промежуточные значения номинального сопротивления соответствуют

** Рассчитаны на 200 аварийных срабатываний системы теплового континента до 2 с.

*** 10 с в режиме нагрева и 60 с в режиме охлаждения.

**** Мощность, при которой сопротивление полупроводникового элемента

***** В жидком азоте.

Продолжение табл. 7.7

Диапазон измеряемой температуры, °C		$P_{\text{макс}}$, мВт, не более		H , мВт/К	G , мВт	τ , с, не более	Срок службы, ч, не менее
от	до	при $T_{\text{ном}}$	при $T_{\text{макс}}$				
0	125	—	3	9	4,5	—	5000
—60	125	—	—	—	10	—	3000
—60	150	—	—	—	—	—	5000
—60	150	—	—	—	—	—	2000
—60	150	—	—	—	—	—	5000
—60	150	—	—	—	—	—	5000
—196	50	2*****	—	0,01****	—	5*****	3000
ПС							
—10	300	100	0,03	0,8	0,1	***	3000
—60	125	40	0,05	0,4	0,1	10	—
—60	125	30	0,01	~1,1	0,3	4	5000
—60	300	45	0,03	0,2	0,08	1	3000
—90	125	15	0,02	0,18	0,05	1	3000
—60	300	60	0,05	0,6	0,15	3	3000
—90	125	45	0,04	0,5	0,12	3	3000
—60	85	8—12****	6—9****	0,06	0,02	15	10000
—60	85	—	—	—	0,25	—	5000
—100	125	8	0,01	0,08	0,02	0,4	3000

шкале ГОСТ 2825—67.

роля при максимальной мощности рассеяния на ПС не более 0,25 Вт в течение вре-

равно 20 Ом.

Т а б л и ц а 7.8. Условия эксплуатации ПС

Тип	Относительная влажность окружающего воздуха, %, не более	Атмосферное давление		Вибра	
		от, кПа	до, Па	при креплении за корпус	
				Диапазон частот, Гц	Ускорение, м/с ² (g)
КМТ-1	80 при 25 °С	980,66	266,64	5...1000	75 (7,5)
ММТ-1	80 при 25 °С	980,66	266,64	5...1000	75 (7,5)
СТЗ-1	80 при 25 °С 98 при 40 °С	980,66	266,64	5...1000	100 (10)
КМТ-4 (а и б)	98 при 40 °С	980,66	266,64	5...1000	75 (7,5)
ММТ-4 (а и б)	98 при 40 °С	980,66	266,64	5...1000	75 (7,5)
ММТ-6	80 при 25 °С	980,66	266,64	—	—
СТЗ-6	98 при 40 °С	980,66	266,64	—	—
КМТ-10	80 при 25 °С	98,07	—	—	—
КМТ-10а					
КМТ-11	80 при 25 °С	98,07	—	—	—
СТ2-26	98 при 40 °С	—	—	—	—
СТ3-26	98 при 40 °С	—	—	—	—
СТ1-2	98 при 40 °С	294,19	53328,00	—	—
СТ4-2	80 при 25 °С	98,07	95990,40	5...600	100 (10)
СТ4-15	80 при 25 °С	98,07	95990,40	5...2000	300 (30)
КМТ-8	98 при 40 °С	980,66	36,66	5...1000	75 (7,5)
СТ3-24	98 при 40 °С	—	—	—	—
СТ3-25	80 при 25 °С	98,07	13,33	10...80	25 (2,5)
СТ3-29	98 при 40 °С	98,07	53328,00	—	—
СТ3-32	98 при 40 °С	294,19	53328,00	—	—
СТ-21; СТ3-21; СТ3-27; СТ1-27	98 при 40 °С	98,07	53328,00	5...80	25 (2,5)
СТ1-30	98 при 40 °С	1470,99	53328,00	5...200	40 (4,0)
СТ3-31	98 при 40 °С	294,19	8532,48	5...80	25 (2,5)
СТ5-1	80 при 25 °С	196,13	103988,60	10...1000	75 (7,5)
СТ6-1А	80 при 25 °С	196,13	103988,60	5...1000	75 (7,5)

ция		Удары		Линейные нагрузки с ускорением, м/с ² (g)	Вес, г, не более
при креплении (пайкой) за выводы		Ускорение, м/с ² (g)	Количество		
Диапазон частот, Гц	Ускорение, м/с ² (g)				
5...600	75 (7,5)	350 (35) 750 (75)	10000 4000	500 (50)	0,6
5...600	75 (7,5)	350 (35) 750 (75)	10000 4000	500 (50)	0,6
5...600	100 (10)	350 (35) 750 (75)	10000 4000	500 (50)	0,6
5...200	40 (4)	350 (35) 750 (35)	10000 4000	500 (50)	2,5
5...200	40 (4)	350 (35) 750 (75)	10000 4000	500 (50)	2,5
45...55	100 (10)	—	—	—	0,05
5...200	40 (4)	350 (35) 1500 (150)	10000 6	500 (50)	0,09
40...50	100 (10)	—	—	—	2
40...50	100 (10)	—	—	—	0,01
—	—	—	—	—	0,3
—	—	—	—	—	0,3
5...80	25 (2,5)	120 (12) 1500 (150)	5000 6	500 (50)	1,5
—	—	750 (75) 1500 (150)	4000 6	500 (50)	0,5
—	—	750 (75) 1500 (150)	4000 6	500 (50)	0,8
—	—	350 (35) 750 (75)	10000 4000	500 (50)	20
—	—	—	—	—	0,3
—	—	120 (12)	5000	350 (35)	2,5
5...80	25 (2,5)	120 (12) 1500 (150)	5000 6	500 (50)	0,06
5...80	25 (2,5)	120 (12) 1500 (150)	5000 6	500 (50)	0,00
—	—	120 (12)	5000	90 (9)	2,8
—	—	1500 (150) 120 (12)	6 10000	500 (50)	6
—	—	1500 (150) 120 (12)	6 5000	90 (9)	2
10...200	40 (4)	1500 (150) 350 (35)	6 10000	2000 (200)	0,7
5...200	40 (4)	1500 (150) 350 (35) 1500 (150)	4000 10000 4000	2000 (200)	0,7

Тип	Относительная влажность окружающего воздуха, %, не более	Атмосферное давление		Вибра	
		от, кПа	до, Па	при креплении за корпус	
				Диапазон частот, Гц	Ускорение, м/с ² (g)
СТ6-1Б	80 при 25 °С	196,13	103988,60	5...1000	75 (7,5)
СТ6-2Б	80 при 25 °С	196,13	103988,60	5...1000	75 (7,5)
СТ6-3Б	80 при 25 °С	196,13	103988,60	5...1000	75 (7,5)
СТ6-4Б	98 при 40 °С	98,07	399,96	5...1000	100 (10)
СТ6-5Б	80 при 25 °С	98,07	53328,00	5...1000	100 (10)
СТ6-6Л	80 при 25 °С	98,07	53328,00	5...1000	100 (10)
СТ6-4Г	98 при 40 °С	98,07	399,96	5...1000	100 (10)
СТ11-1Г	98 при 40 °С	98,07	399,96	5...1000	100 (10)
СТ10-1	95 при 25 °С	98,07	99990,00	—	—
ММТ-8	98 при 40 °С	980,66	6,66	5...1000	75 (7,5)
ММТ-9	80 при 25 °С	980,66	266,64	5...600	75 (7,5)
КМТ-12	80 при 25 °С	98,07	1333,20	10...600	75 (7,5)
ММТ-12	80 при 25 °С	98,07	1333,20	10...600	75 (7,5)
ММТ-13	80 при 25 °С	980,66	266,64	5...600	75 (7,5)
(а и б)					
КМТ-17	80 при 25 °С	980,66	266,64	10...1000	75 (7,5)
(а, б и в)					
СТ1-17	98 при 40 °С	980,66	266,64	10...1000	75 (7,5)
СТ3-17	98 при 40 °С	980,66	266,64	10...1000	75 (7,5)
СТ4-17	98 при 40 °С	980,66	266,64	—	—
СТ3-23	98 при 40 °С	98,07	95990,40	10...80	25 (2,5)
ПТ, ПТ-1		98,07	2479,75	20...80	100 (10)
ПТ-2, ПТ-3				15...300	55 (5,5)
ПТ-4					
СТ7-1	98 при 40 °С	294,19	133,32·10 ⁻⁶	—	—
КМТ-14	98 при 40 °С	98,07	666,60	10...80	100 (10)
СТ3-14	98 при 40 °С	291,19	95990,40	5...5000	200 (20)
СТ1-18	80 при 25 °С	98,07	266,64	10...200	40 (4)
СТ3-18	80 при 25 °С	98,07	266,64	10...200	40 (4)
СТ1-19	80 при 25 °С	98,07	266,64	10...1000	150 (15)
СТ3-19	80 при 25 °С	98,07	266,64	10...1000	150 (15)
СТ3-22	98 при 40 °С	98,07	53328,00	10...80	25 (2,5)

Продолжение табл. 7.8

ция		Удары		Линейные нагрузки с ускорением, м/с ² (g)	Вес, г, не более
при креплении (пайкой) за выводы		Ускорение, м/с ² (g)	Количество		
Диапазон частот, Гц	Ускорение, м/с ² (g)				
5...200	40 (4)	350 (35) 1500 (150)	10000 4000	2000 (200)	0,7
—	—	1500 (150)	4000	2000 (200)	6
5...80	75 (7,5)	350 (35) 1500 (150)	10000 4000	2000 (200)	0,2
5...80	40 (4)	350 (35) 1500 (150)	10000 6	500 (50) 500 (50)	1
—	—	350 (35)	10000	500 (50)	6
—	—	350 (35)	10000	500 (50)	6
5...80	40 (4)	350 (35) 1500 (150)	10000 6	500 (50)	1
5...80	40 (4)	350 (35)	10000	500 (50)	1
5...200	100 (10)	150 (15) 1500 (150)	10000 6	150 (15)	0,6
—	—	350 (35) 750 (75)	10000 4000	500 (50)	20
—	—	350 (35)	10000	500 (50)	3,4
—	—	350 (35)	10000	500 (50)	1,7
—	—	350 (35)	10000	500 (50)	1,7
—	—	350 (35)	1000	500 (50)	12,0
—	—	350 (35)	10000	250 (25)	1,5
10...80	45 (4,5)	350 (35)	10000	250 (25)	0,2
10...80	45 (4,5)	350 (35)	10000	250 (25)	0,2
5...200	40 (4)	350 (35) 1500 (150)	10000 6	500 (50)	1,5
—	—	120 (12)	5000	90 (9)	1,5
—	—	40 (4)	10000	—	От 0,15 до 1,2
5...80	100 (10)	350 (35) 1500 (150)	10000 6	500 (50)	Для различных типов 0,5
—	—	120 (12)	5000	—	4
—	—	350 (35) 1500 (150)	10000 6	1000 (100)	0,2
—	—	120 (12)	5000	90 (9)	0,003
—	—	120 (12)	5000	90 (9)	Без траверс 0,003
—	—	120 (12)	5000	90 (9)	Без траверс 0,3
—	—	120 (12)	5000	90 (9)	0,3
—	—	120 (12)	5000	90 (9)	4

Таблица 7.9. Основные характеристики ПС с положительным ТКС

Характеристика	Тип			
	СТ5-1	СТ6-1А	СТ6-1Б	СТ6-2Б
Сопротивление при 20 °С, Ом (в пределах)	20...150	40...400	180 ± 20 % 270 ± 20 %	10...100
Температурный интервал положительного ТКС, °С	100...200	40...155	20...125	0...125
Температурный интервал максимального ТКС, °С (ориентировочно)	125...135	90...120	70...100	70...95
Максимальный ТКС, %/К (не менее)	20	10	15	15
Кратность изменения сопротивления в области положительного ТКС (не менее)*	10 ³	10 ³	10 ⁴	10 ⁴
Диапазон рабочих температур, °С	От —20 до 200	От —60 до 155	От —60 до 125	От —60 до 125
Максимально допустимая мощность, Вт	0,7	1,1	0,8	1,3***
Коэффициент рассеяния, мВт/К (не более)	9	9	9	14
Постоянная времени, с (не более)	20	20	20	—
Срок службы, ч	3000	3000	3000	3000
Срок хранения, лет	3	3	3	3

* Значения кратности приведены для ПС, нагреваемых за счет внешней

** При 25 °С.

*** Для ПС с припаянными красномедными выводами диаметром 0,2 мм и

ных ТС изготавливаются из сегнетоэлектрических керамик на основе титанатов, цирконатов, глицинатов и т. п., свинца, бария, мышьяка и др. Их ТКС может превышать 10 % /К. Они применяются в сравнительно узком диапазоне температур (от 20 до 100 °С), причем для каждого типа позистора диапазон измерения еще уже и составляет несколько кельвинов. Пока позисторные ТС находят ограниченное применение в системах автоматики и защиты. Превосходные характеристики по мере развития технологии производства должны открыть им широкое применение.

Конструктивное оформление позисторных ТС аналогично такому в термисторах. В диапазоне измеряемой температуры температурная зависимость сопротивления позисторов носит экспоненциальный характер: $R = Ae^{\alpha m}$. Изменение сопротивления за пределами этого диапазона показано на рис. 7.44. Основные характеристики позисторных ТС, серийно поставляемых промышленностью СССР, приведены в табл. 7.9.

СТ6-3Б	СТ6-4Б	СТ6-5Б	СТ6-6Б	СТ6-4Г	СТ10-1	СТ11-1Г
10 ³ ...10 ⁴	100...400	3...20	5...25	5·10 ³ ... 2,5·10 ⁴	3·10 ⁴ ... 1·10 ⁵ **	100...300
10...125	20...125	20...125	20...125	—20...125	—20...70	—20...125
60...90	70...100	70...100	70...100	10...70	10...70	10...70
15	15	15	15	2...6	2...4	6...9
10 ⁴	10 ⁴	10 ³	10 ³	5...15	~10	20...80
От —60 до 125 0,2	От —60 до 125 0,8	От —60 до 125 2,5	От —60 до 125 2,5	От —60 до 125 0,8	От —60 до 70 0,3...0,7	От —60 до 125 0,8
0,25	9	25	25	9	—	9
10	40	10	180	40	50	40
3000 3	3000 12	3000 12	3000 12	3000 12	3000 3	3000 12

среды.

длиной 70 мм.

7.5. Поверка ТС

Конструкции и технические характеристики промышленных ТС должны удовлетворять требованиям соответствующих нормативных документов (стандартов, технических условий, инструкций по поверке). Среди них особенно важны метрологические требования, предусматривающие правильность и точность показаний при нормальных условиях и при отступлении от них. Для этой цели в нормативных документах, утверждаемых Госстандартом СССР, предусмотрено проведение государственных испытаний мер и средств измерения, государственная и ведомственная их поверка (ГОСТ 8.001—80).

В процессе государственных испытаний, которым подвергают опытные образцы ТС, намеченные к серийному производству, определяют: соответствуют ли они требованиям государственных стандартов и других нормативных документов; возможно ли метрологическое обслуживание и практическое обеспечение метрологических характеристик, требуемых нормативными документами, при их серийном производстве и эксплуатации; соответствуют ли конструктивные, метрологические и эксплуатационные характеристики ТС требованиям потребителей. Определяют также, какие именно метрологические характе-

ристики ТС подлежат контролю при выпуске из производства и при эксплуатации, периодичность, методы этого контроля (с указанием необходимых нормативных документов и средств контроля) и изменения, которые должны быть внесены в конструкцию ТС и техническую документацию.

При государственной или ведомственной поверке, которой подвергаются ТС, выпускаемые из производства или ремонта, а также при периодической поверке ТС, находящихся в эксплуатации, определяют соответствие их лишь некоторым, предусмотренным поверочной инструкцией, требованиям стандарта или другого нормативного документа.

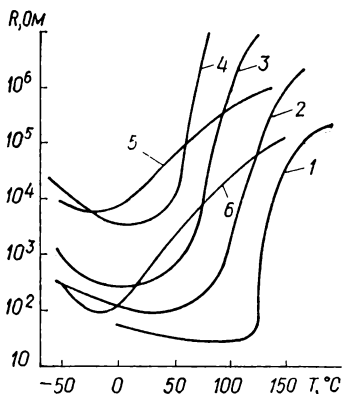


Рис. 7.44. Зависимость сопротивления позисторов различных типов от температуры:

1 — СТ5-1; 2 — СТ6-1А; 3 — СТ6-1В и СТ6-4Б; 4 — СТ6-3Б; 5 — СТ6-4Г; 6 — СТ11-1Г.

Поверка ТС сводится к определению зависимости между термометрическим свойством (сопротивлением) и измеряемой температурой. В результате поверки получают номинальную статическую характеристику, выражающую указанную зависимость, либо определяют численное значение коэффициентов (или постоянных) математической формулы, выражающей ту же зависимость.

Для стандартных номинальных статических характеристик ТС поверочными инструкциями предусмотрена раздельная поверка основных частей термометра (ТС и показывающего или самопишущего прибора). Отдельно поверяют ТС и отдельно измерительные приборы к ним — логометры, электронные потенциометры и мосты.

При поверке ТС необходимы устройства, воспроизводящие требуемую для поверки температуру.

В этом случае применяют различные методы поверки: 1) по постоянным точкам плавления и кипения химически чистых веществ (преимущественно для эталонных и образцовых ТС); 2) сравнение с показаниями образцовых ТС. Для поверки рабочих ТС используются легко воспроизводимые точки таяния льда, кипения воды, кипения кислорода и азота. При поверке методом сравнения с образцовыми ТС применяют устройства, обеспечивающие получение любой заданной температуры в определенных температурных диапазонах.

Термостаты и печи для поверок. При поверках ТС методом сравнения с образцовыми одним из основных условий, гарантирующих правильность и точность результатов поверки, является равенство температур чувствительных элементов образцового и поверяемого. В диапазоне температур от -100 до 600°C это условие наилучшим образом обеспечивается в жидкостных ваннах (термостатах и криостатах) с интенсивным принудительным перемешиванием жидкости. Для заполнения криостатов и термостатов в зависимости от температурного диапазона их применения используют различные жидкости. Важным свойством рабочих жидкостей является вязкость. При малой вязкости жидкость лучше перемешивается мешалкой, чем достигается более равномерное распределение температуры в термостате.

Вода во всем температурном диапазоне от 0 до 100 °С обладает достаточно малой вязкостью и легко перемешивается. У нефтяных масел вязкость зависит от температуры, уменьшаясь с повышением температуры. Поэтому такие масла, как индустриальные общего назначения (ГОСТ 20799—75) или цилиндровое тяжелое (ГОСТ 6411—76), не применяются для проверок в диапазоне температур от 0 до 100 °С.

Для проверок ТС в диапазоне от 0 до —210 °С выпускается адиабатический криостат ГСП-5, в котором в качестве охлаждающего агента используют жидкий азот. Поверяемые ТС устанавливаются в блоке из меди, охлаждаемом жидким азотом. Вследствие хорошей теплопро-

Т а б л и ц а 7.10. Характеристики образцовых средств измерения температуры

Номер	Наименование и тип	Диапазон измеряемых температур, °С		Данные, приводимые в свидетельстве
		от	до	
1	ТС платиновые ПТС-10, $R_0 = 10$ Ом, I и II разрядов	—183	630	$R_{-182,97}$; R_0 ; R_{100} ; $R_{419,505}$
2	ТС платиновые ТСПН-1, $R_0 = 100$ Ом, I и II разрядов	—259,3	0	R_0 ; α ; величина поправок к стандартной таблице ΔW_t
3	Термометры стеклянные ртутные равноделенные I разряда	0	60	Таблицы поправок для восьми точек с интервалом 0,5 °С и положение нулевой точки
3.1	ТР-1 и ТР-2, набор из 15 шт., диапазон шкалы 4 °С, цена деления 0,01 °С	60	100	Таблицы поправок для восьми точек с интервалом 1 °С и положение нулевой точки
3.2	ТР-3, набор из 5 шт., диапазон шкалы 8 °С, цена деления 0,02 °С			
3.3	ТР-4, набор из 5 шт., диапазон шкалы 10 °С, цена деления 0,02 °С			
3.4	Термометры стеклянные ртутные ТЛ-4 второго разряда, набор из 11 шт., диапазон шкалы 50 °С, цена деления 0,1 °С	—30	500	Таблицы поправок для десяти или пяти точек шкалы и положение нулевой точки
3.5	Термометры стеклянные ртутные ТЛ-4 третьего разряда, набор из 11 шт., диапазон шкалы 50 °С, цена деления 0,1 °С	—30	600	То же

водности меди в блоке обеспечивается однородное температурное поле и равенство температур образцовых и поверяемых ТС. Этот криостат позволяет получать и поддерживать температуру с точностью до $\pm 0,1$ К в диапазоне температур от 0 до -180°C при атмосферном давлении и до -210°C при пониженном давлении. Для поверок ТС в диапазоне температур от 300 до 600°C кроме солевых и оловянных термостатов применяют электрические печи с блоками из красной меди и алюминия.

Образцовые средства. При поверке ТС применяют образцовые средства первого, второго и третьего разрядов. Большинство из этих средств приведены в табл. 7.10. Кроме стеклянных ртутных термометров все указанные средства имеют индивидуальные характеристики, определяемые в результате поверки этих средств.

Наиболее точным методом измерения ЭДС, напряжения, силы тока и сопротивления в цепях постоянного тока является компенсационный метод. Для измерения указанных величин в поверочных лабораториях применяются компенсационные установки с низкоомными потенцио-

Таблица 7.11. Характеристики потенциометров и мостов, применяемых в поверках

Наименование и тип	Класс точности	Значение ступени последней декады	Верхний предел измерения
Потенциометры постоянного тока:			
лабораторный низкоомный	0,002	0,1 мкВ	2000 мВ
шести декадный двухрядный Р363/2			
переносной с тремя пределами измерения ПП-63	0,05	25 мкВ 50 мкВ 100 мкВ	25 мВ 50 мВ 100 мВ
Мосты постоянного тока:			
лабораторный одинарный МО-61	0,05	10^{-2} Ом	10^8 Ом
одинарно-двойной Р-39	0,01	10^{-2} Ом	10^8 Ом

метрами постоянного тока. В табл. 7.11 приведены типы потенциометров, мостов и образцовых мер, применяемых при поверке ТС. Для поверки и градуировки технических ТС в диапазоне от -40 до 1800°C применяется установка УТТ-6.

Для поверки образцовых и лабораторных ТС (ГОСТ 12877—76) применяют следующие образцовые средства и аппаратуру: потенциометр постоянного тока класса 0,005 по ГОСТ 9245—68 или мост постоянного тока соответствующего класса; образцовую катушку сопротивления первого разряда для ТСПН-1 и второго разряда для ТСПН-2; эталонный платиновый ТС для диапазона измеряемых температур от 12 до 95°K для поверки ТСПН-2; образцовый платиновый ТС для диапазона международной практической шкалы температур (ГОСТ 8550—61); ледяную ванну с сосудом для тройной точки воды; кипятильник для точки кипения воды; установку для создания в ваннах сжиженных газов при атмосферном и пониженном давлении (под откачкой).

Сопротивление ТС измеряют в тройной точке и точке кипения воды, а также при четырех температурах в диапазоне от 14 до 90 К, примерно соответствующих температуре кипения азота при атмосферном давлении (78 К); температуре кипения азота при пониженном давлении (50 К) и (20 К); температуре кипения водорода при атмосферном давлении (14 К).

Отклонение единичного измерения сопротивления при 0 °С (R_0) и отклонение (ΔW_{H_2}) единичного измерения относительного сопротивления в точке кипения водорода ($W'_{H_2} R'_{H_2} / R_0$) от их средних значений (R_0^{cp} и $W_{H_2}^{cp}$), полученных при данной поверке, а также разность значений (R_0^{cp} и $W_{H_2}^{cp}$) для двух последующих поверок ($R_0^I - R_0^{II}$ и $W_{H_2}^I - W_{H_2}^{II}$) не должны превышать значений, указанных в табл. 7.12.

Таблица 7.12. Отклонения единичного измерения сопротивления в точке кипения водорода от номинального сопротивления

Тип ТС	ΔR_0	$R_0^I - R_0^{II}$	$\Delta W_{H_2}, 10^{-6}$	$W_{H_2}^I - W_{H_2}^{II}, 10^{-6}$
	% R_0			
ТСПН-1	+0,001	+0,002	2	3
ТСПН-2	+0,003	+0,005	4	5

По результатам измерения сопротивления эталонного или образцового и поверяемых ТС вычисляют их относительное сопротивление при четырех температурах диапазона от 14 до 90 К:

$$\text{при } T_1 \sim 78\text{K} \quad W_{T_1} = \frac{R_{T_1}}{R_0}, \quad W_{T_1}^{\text{эТ}} = \frac{R_{T_1}^{\text{эТ}}}{R_0^{\text{эТ}}};$$

$$\text{при } T_2 \sim 50\text{K} \quad W_{T_2} = \frac{R_{T_2}}{R_0}, \quad W_{T_2}^{\text{эТ}} = \frac{R_{T_2}^{\text{эТ}}}{R_0^{\text{эТ}}};$$

$$\text{при } T_3 \sim 20\text{K} \quad W_{T_3} = \frac{R_{T_3}}{R_0}, \quad W_{T_3}^{\text{эТ}} = \frac{R_{T_3}^{\text{эТ}}}{R_0^{\text{эТ}}};$$

$$\text{при } T_4 \sim 14\text{K} \quad W_{T_4} = \frac{R_{T_4}}{R_0}, \quad W_{T_4}^{\text{эТ}} = \frac{R_{T_4}^{\text{эТ}}}{R_0^{\text{эТ}}}.$$

Допустимая относительная погрешность в измерениях R должна быть не более $10^{-6} R$.

По измеренным относительным сопротивлениям эталонного ТС $W_{T_1}^{\text{эТ}}, W_{T_2}^{\text{эТ}}, W_{T_3}^{\text{эТ}}, W_{T_4}^{\text{эТ}}$, пользуясь свидетельством о его аттестации и дан-

ными таблицы $T = f(W_{ст})$ по ГОСТ 8.157—75, определяют температуры T_1, T_2, T_3, T_4 , принимая их за действительные. По определенным таким образом температурам и результатам измерения сопротивлений поверяемого ТС находят коэффициенты линейной интерполяции по интервалам согласно ГОСТ 12877—76.

Проверка образцовых ТС заключается в определении их сопротивления в трех реперных точках: тройной точке воды $R_{тр}$, точке кипения воды R_{100} (или точке затвердевания олова R_{Sn}) и точке затвердевания цинка R_{Zn} .

При изготовлении технических ТС неизбежны случайные отклонения их характеристик от номинальных (стандартных) значений. Среди причин, вызывающих эти отклонения, наиболее существенны следующие: погрешность подгонки номинального сопротивления (при 0 °C); отклонение коэффициентов различных партий платиновой и медной проволоки от значений, положенных в основу стандартных таблиц. Для обеспечения точности ТС по ГОСТ 6651—78 установлены допустимые отклонения от R_0 и W_{100} .

Для медных ТС, вследствие линейной зависимости их сопротивления от температуры, для определения всей статической характеристики, а следовательно, и отклонений ее от стандартной таблицы в диапазоне измеряемых температур от —50 до 200 °C достаточно измерения только двух величин: R_0 и W_{100} . Для платиновых ТС, вследствие нелинейной зависимости сопротивления R_t от температуры t , вычисление интерполяционных коэффициентов требует не менее трех результатов измерений. Однако и в этом случае установленные стандартом допустимые погрешности в значениях R_0 и W_{100} практически однозначно определяют допустимые погрешности ТС в диапазоне измеряемых температур от —200 до 750 °C.

Таким образом, проверка показаний технических стандартных ТС сводится к измерению их сопротивления R_0 и R_{100} в двух легко воспроизводимых постоянных точках — температурах 0 и 100 °C и к вычислению отношения W_{100} .

Для измерения R_0 ТС погружают в нулевую ванну, а для измерения R_{100} — в паровой термостат. Глубина погружения и время выдержки в ванне или термостате до начала измерения должны быть достаточны, чтобы обеспечить уравнивание температуры чувствительного элемента ТС с 0 °C или температурой паров кипящей воды 100 °C. Поверочная инструкция требует погружения ТС не менее чем на 30 см и времени выдержки не менее 10 мин.

Сопротивление поверяемого ТС измеряют компенсационным методом либо двойным мостом. При проверке технических платиновых ТС I класса, у которых допустимая погрешность действительного значения R_0 равна $\pm 0,05$ % номинального значения R , а допустимое отклонение W_{100} равно $\pm 0,0005$ или $\pm 0,001$ % стандартного значения 1,391, применяются образцовые катушки сопротивления класса 0,01 и образцовые потенциометры классов 0,01 или 0,02 (с учетом поправок). Температуру паров кипящей воды в кипятильнике измеряют образцовым стеклянным ртутным термометром второго разряда.

Проверке подвергаются платиновые ТС, рабочие ТС нестандартных характеристик и стандартные ТС при повышенных требованиях к точности их статических характеристик. Цель проверки — установление индивидуальной статической характеристики ТС в виде таблицы или формулы, которые позволяют определить измеряемую термопреобразователем температуру t по сопротивлению R_t ТС.

При проверке ТС, у которых зависимость R_t от t не может быть вы-

ражена простой формулой (например, никелевые ТС), определяют значения R_t через равные температурные интервалы методом сравнения с образцовым ТС.

Полупроводниковые ТС поверяются в следующей последовательности.

1. Определяется допустимый измерительный ток. Измерительный ток, проходящий через ТС, не должен вызывать его перегрева более чем на половину допустимой погрешности измерения. Для этой цели измеряют R_t термопреобразователя при одной температуре (20 °С), но при двух значениях измерительного тока I_1 и I_2 , получая два значения R_1 и R_2 . Далее, после вычисления мощностей, выделяемых в ТС, $P_1 = I_1^2 R_1$ и $P_2 = I_2^2 R_2$, по двум точкам с координатами P_1, R_1 и P_2, R_2 строят прямую в прямоугольных координатах P_1 и P_2 . Указанный график и ТКС преобразователя, вычисленный по двум точкам (например, R_{20} и R_{21}), позволяют определить зависимость величины перегрева ТС Δt от измерительного тока в указанном диапазоне температур.

2. Определяется стабильность показаний сравнением значений R_0 (или R_{20}), полученных до и после выдержки в течение 200 ч ТС при температуре, соответствующей верхнему пределу измерения. 3. Определяется статическая характеристика ТС одним из следующих методов: а) измерением R_t при температурах t_1, t_2 и t_3 и вычислением констант A, b и B в формуле $R_t = A t^b e^{B/t}$, выражающей зависимость R_t от t ; б) измерением R_t при температурах t_1 и t_2 и вычислением констант A и B в формуле $R_t = A e^{B/t}$, пригодной для узкого температурного диапазона (не более 25 °С); в) измерением R_t при нескольких температурах с равными температурными интервалами.

7.6. Номинальные статические характеристики преобразования ТС

Номинальные статические характеристики преобразования ТС регламентированы ГОСТ 6651—78 и приведены в табл. 7.13—7.20. Относительные статические характеристики W_t для платины в диапазоне от —260 °С до —200 °С также регламентированы ГОСТ 6651—78 и приведены для градуировки 100 П в табл. 7.21, а для градуировки 50 П — в табл. 7.22. Значения относительных статических характеристик для медных ТС приведены в табл. 7.23, для никелевых — в табл. 7.24. В отдельных странах применяют платиновые ТС с отношением $W_{100} = 1,385$. Для этих условий относительная статическая характеристика с шагом в 5 К приведена в табл. 7.25, а для $W_{100} = 1,3910$ (отличающейся от принятой в СССР) — в табл. 7.26.

Таблица 7.13. Номинальные статические характеристики преобразования 100 П ($R_0 = 100 \text{ Ом}$); 10 П ($R_0^* = 10 \text{ Ом}$) и 1 П ($R_0^* = 1 \text{ Ом}$) для диапазона температур от -260 до -750°C

Температура рабочего конца, $^\circ\text{C}$	Сопротивление, Ом, для температуры, $^\circ\text{C}$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-260	0,406	0,919	0,827	0,745	0,673	0,610	0,555	0,507	0,465	0,430
-250	1,022	2,481	2,269	2,071	1,886	1,712	1,550	1,401	1,262	1,137
-240	2,701	5,167	4,855	4,551	4,257	3,971	3,696	3,431	3,176	2,933
-230	5,487	8,876	8,298	7,926	7,559	7,197	6,842	6,494	6,151	5,815
-220	9,058	12,660	12,248	11,838	11,431	11,027	10,626	10,228	9,834	9,444
-210	13,075	16,878	16,450	16,023	15,598	15,174	14,751	14,329	13,909	13,491
-200	17,307	21,221	20,784	20,347	19,909	19,471	19,035	18,601	18,168	17,737
-190	21,657	25,554	25,122	24,690	24,258	23,825	23,392	22,959	22,525	22,091
-180	25,986	29,851	29,422	28,993	28,563	28,133	27,703	27,273	26,842	26,411
-170	30,279	34,125	33,659	33,273	32,846	32,419	31,992	31,564	31,137	30,708
-160	34,552	38,374	37,949	37,524	37,101	36,676	36,252	35,827	35,402	34,977
-150	38,799	42,588	42,168	41,747	41,326	40,904	40,483	40,061	39,639	39,217
-140	43,008	46,777	46,359	45,940	45,523	45,104	44,686	44,267	43,847	43,428
-130	47,195	50,943	50,528	50,112	49,696	49,279	8,862	48,445	48,029	47,612
-120	51,359	55,086	54,673	54,259	53,846	53,432	53,018	52,603	52,189	51,774
-110	55,500	59,209	58,799	58,387	57,975	57,563	57,151	56,739	56,326	55,912
-100	59,621	63,316	62,906	62,496	62,086	61,676	61,265	60,854	60,443	60,032
-90	63,724	67,404	66,996	66,587	66,179	65,771	65,362	64,953	64,544	64,134
-80	67,812	71,476	71,070	70,663	70,256	69,850	69,443	69,034	68,628	68,220
-70	71,883	75,535	75,130	74,725	74,319	73,914	73,508	73,101	72,695	72,289
-60	75,940	79,580	79,175	78,771	78,368	77,963	77,559	77,155	76,750	76,346
-50	79,983	83,609	83,207	82,805	82,402	82,000	81,596	81,193	80,790	80,387
-40	84,012	87,627	87,226	86,825	86,423	86,022	85,629	85,218	84,816	84,414
-30	88,028	91,631	91,231	90,831	90,431	90,031	89,631	89,230	88,830	88,429
-20	92,032									

+10	96,022	95,624	94,827	94,428	94,028	93,629	93,230	92,830	92,431
—0	100,000	99,603	98,808	98,411	98,012	97,615	97,217	96,819	96,421
—0	100,000	100,397	101,191	101,587	101,984	102,380	102,776	103,172	103,568
+10	103,365	104,361	105,152	105,548	105,944	106,339	106,734	107,129	107,524
+20	107,919	108,313	109,103	109,498	109,892	110,286	110,680	111,073	111,467
+30	111,861	112,254	113,041	113,434	113,828	114,220	114,613	115,006	115,398
+40	115,791	116,183	116,967	117,359	117,751	118,142	118,534	118,925	119,317
+50	119,708	120,100	120,881	121,271	121,662	122,053	122,443	122,833	123,223
+60	123,613	124,003	124,783	125,172	125,562	125,951	126,340	126,729	127,118
+70	127,507	127,895	128,672	129,060	129,448	129,836	130,224	130,612	131,000
+80	131,388	131,775	132,549	132,936	133,323	133,710	134,097	134,484	134,870
+90	135,256	135,642	136,028	136,415	136,801	137,186	137,572	137,958	138,343
+100	139,113	139,498	140,268	140,653	141,038	141,423	141,807	142,191	142,576
+110	142,959	143,343	143,727	144,110	144,494	144,877	145,260	145,643	146,026
+120	146,792	147,175	147,558	148,322	148,704	149,087	149,469	149,851	150,233
+130	150,613	150,995	151,758	152,138	152,519	152,900	153,281	153,662	154,043
+140	154,423	154,803	155,563	155,943	156,323	156,704	157,083	157,463	157,843
+150	158,221	158,600	159,358	159,736	160,115	160,494	160,873	161,251	161,629
+160	162,007	162,385	163,141	163,518	163,896	164,274	164,650	165,027	165,404
+170	165,781	166,158	166,911	167,288	167,664	168,040	168,417	168,793	169,169
+180	169,544	169,919	170,295	171,045	171,420	171,795	172,170	172,545	172,920
+190	173,294	173,668	174,043	174,417	174,791	175,166	175,540	175,913	176,287
+200	177,033	177,408	177,779	178,152	178,525	178,898	179,271	179,644	180,016
+210	180,760	181,132	181,876	182,248	182,619	182,991	183,362	183,734	184,105
+220	184,475	184,846	185,217	185,588	185,958	186,328	186,698	187,069	187,439
+230	188,179	188,549	188,919	189,288	189,658	190,027	190,397	190,767	191,135
+240	191,873	192,241	192,610	192,978	193,347	193,715	194,083	194,451	194,819
+250	195,552	195,920	196,287	196,654	197,021	197,389	197,755	198,122	198,488
+260	199,221	199,587	199,953	200,320	200,686	201,051	201,417	201,783	202,148
+270	202,878	203,243	203,608	203,973	204,338	204,703	205,067	205,432	205,796
+280	206,523	206,887	207,251	207,615	207,978	208,342	208,705	209,069	209,432
+290	210,158	210,521	210,883	211,245	211,607	211,970	212,332	212,694	213,056
+300	213,779	214,141	214,503	214,864	215,225	215,586	215,947	216,308	216,668

Темпера- тура рабочего конца, °C	Сопротивление, Ом, для температуры, °C									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
+310	217,390	217,751	218,111	218,470	218,830	219,190	219,550	219,910	220,270	220,629
+320	220,988	221,348	221,708	222,066	222,425	222,784	223,142	223,501	223,859	224,218
+330	224,576	224,934	225,292	225,650	226,007	226,365	226,723	227,080	227,437	227,794
+340	228,151	228,508	228,865	229,222	229,578	229,935	230,291	230,647	231,002	231,358
+350	231,715	232,071	232,427	232,782	233,137	233,493	233,848	234,203	234,558	234,913
+360	235,267	235,622	235,977	236,331	236,685	237,039	237,393	237,747	238,100	238,454
+370	238,807	239,161	239,514	239,867	240,220	240,573	240,926	241,279	241,631	241,984
+380	242,336	242,688	243,040	243,392	243,744	244,096	244,447	244,799	245,150	245,501
+390	245,853	246,204	246,555	246,905	247,256	247,607	247,957	248,307	248,657	249,008
+400	249,358	249,707	250,057	250,407	250,756	251,106	251,455	251,804	252,153	252,502
+410	252,852	253,200	253,549	253,897	254,246	254,594	254,942	255,290	255,638	255,985
+420	256,333	256,680	257,028	257,375	257,722	258,069	258,416	258,763	259,110	259,456
+430	259,803	260,149	260,495	260,841	261,187	261,533	261,879	262,224	262,570	262,915
+440	263,260	263,605	263,950	264,295	264,640	264,986	265,330	265,675	266,019	266,363
+450	266,707	267,051	267,395	267,739	268,082	268,426	268,769	269,112	269,456	269,799
+460	270,142	270,484	270,827	271,169	271,512	271,854	272,196	272,538	272,880	273,222
+470	273,564	273,906	274,247	274,588	274,930	275,271	275,611	275,952	276,292	276,633
+480	276,975	277,315	277,655	277,995	278,335	278,675	279,014	279,354	279,694	280,033
+490	280,372	280,712	281,051	281,390	281,729	282,068	282,406	282,745	283,083	283,421
+500	283,760	284,098	284,435	284,772	285,110	285,448	285,785	286,123	286,460	286,797
+510	287,134	287,471	287,808	288,144	288,481	288,816	289,152	289,489	289,825	290,161
+520	290,496	290,832	291,168	291,503	291,839	292,173	292,508	292,843	293,178	293,513
+530	293,847	294,182	294,516	294,849	295,184	295,518	295,852	296,185	296,518	296,852
+540	297,185	297,519	297,852	298,185	298,518	298,850	299,182	299,515	299,848	300,179
+550	300,511	300,844	301,176	301,508	301,838	302,170	302,502	302,833	303,163	303,495
+560	303,826	304,157	304,488	304,818	305,148	305,479	305,809	306,139	306,468	306,798
+570	307,128	307,457	307,787	308,117	308,446	308,774	309,104	309,433	309,762	310,090

+580	310,418	310,746	311,074	311,403	311,731	312,058	312,386	312,713	313,040	313,368
+590	313,694	314,022	314,348	314,675	315,001	315,328	315,655	315,982	316,308	316,634
+600	316,960	317,286	317,611	317,937	318,262	318,588	319,913	319,238	319,563	319,888
+610	320,212	320,537	320,861	321,186	321,510	321,834	322,158	322,482	322,806	323,130
+620	323,453	323,777	324,100	324,423	324,746	325,069	325,392	325,715	326,037	326,360
+630	326,682	327,004	327,325	327,647	327,968	328,289	328,611	328,932	329,253	329,573
+640	329,894	330,216	330,536	330,857	331,178	331,498	331,818	332,139	332,458	332,779
+650	333,098	333,418	333,737	334,056	334,375	334,694	335,013	335,332	335,650	335,970
+660	336,286	336,606	336,924	337,242	337,560	337,878	338,196	338,513	338,830	339,148
+670	339,465	339,782	340,099	340,416	340,732	341,051	341,365	341,682	341,998	342,314
+680	3 2 631	342,948	343,263	343,580	343,896	344,211	344,527	344,842	345,158	345,473
+690	345,788	346,103	346,417	346,732	347,046	347,360	347,674	347,988	348,302	348,616
+700	348,931	349,244	349,558	349,869	350,184	350,497	350,810	351,123	351,435	351,748
+710	352,061	352,374	352,686	352,998	353,310	353,622	353,934	354,245	354,557	354,868
+720	355,180	355,491	355,808	356,114	356,426	356,737	357,048	357,359	357,670	357,980
+730	358,291	358,601	358,911	359,221	359,531	359,840	360,149	360,459	360,768	361,077
+740	361,387	361,696	362,004	362,313	362,621	362,930	363,238	363,546	363,854	364,162
+750	364,470	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Значение делится соответственно на 10, 100.

Т а б л и ц а 7.14. Номинальные статические характеристики преобразования 500 П ($R_0 = 500 \text{ Ом}$); 50 П ($R_0^* = 50 \text{ Ом}$) и 5 П ($R_0^* = 5 \text{ Ом}$) для диапазона температур от -260 до 750°C

Темпера- тура рабочего конца, °C	Сопротивление, Ом, для температуры, °C									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
—260	0,203									
—250	0,511	0,460	0,414	0,373	0,336	0,305	0,278	0,254	0,233	0,215
—240	1,351	1,239	1,135	1,036	0,943	0,856	0,775	0,701	0,631	0,569
—230	2,744	2,584	2,428	2,276	2,129	1,986	1,848	1,716	1,588	1,467

Температура рабочего конца, °C	Сопротивление, Ом, для температуры, °C									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-220	4,529	4,338	4,149	3,963	3,780	3,599	3,421	3,247	3,076	2,908
-210	6,538	6,330	6,124	5,919	5,716	5,514	5,313	5,114	4,917	4,722
-200	8,654	8,439	8,225	8,012	7,799	7,587	7,376	7,165	6,955	6,746
-190	10,828	10,611	10,392	10,174	9,954	9,736	9,518	9,301	9,085	8,868
-180	12,993	12,777	12,561	12,345	12,129	11,912	11,696	11,479	11,262	11,046
-170	15,139	14,925	14,711	14,496	14,281	14,066	13,851	13,636	13,421	13,205
-160	17,276	17,062	16,849	16,636	16,423	16,209	15,996	15,782	15,568	15,354
-150	19,399	19,187	18,974	18,762	18,550	18,338	18,126	17,913	17,701	17,488
-140	21,504	21,294	21,084	20,873	20,663	20,452	20,241	20,030	19,819	19,608
-130	23,597	23,388	23,179	22,970	22,761	22,552	22,343	22,133	21,923	21,714
-120	25,679	25,471	25,264	25,056	24,848	24,639	24,431	24,222	24,014	23,806
-110	27,750	27,543	27,336	27,129	26,923	26,716	26,509	26,301	26,094	25,887
-100	29,810	29,604	29,399	29,193	28,987	28,781	28,575	28,369	28,163	27,956
-90	31,862	31,658	31,453	31,248	31,043	30,838	30,632	30,427	30,221	30,016
-80	33,906	33,702	33,498	33,293	33,090	32,885	32,681	32,476	32,272	32,067
-70	35,941	35,738	35,535	35,331	35,128	34,925	34,721	34,517	34,314	34,110
-60	37,970	37,767	37,565	37,362	37,159	36,957	36,754	36,550	36,347	36,144
-50	39,991	39,790	39,587	39,385	39,184	38,980	38,779	38,577	38,375	38,173
-40	42,006	41,804	41,603	41,402	41,201	41,000	40,798	40,596	40,395	40,193
-30	44,014	43,813	43,613	43,412	43,211	43,011	42,810	42,609	42,408	42,207
-20	46,016	45,815	45,616	45,415	45,215	45,015	44,815	44,615	44,415	44,214
-10	48,011	47,812	47,612	47,413	47,214	47,014	46,814	46,615	46,415	46,215
-0	50,000	49,801	49,603	49,404	49,205	49,006	48,807	48,608	48,409	48,210
0	50,000	50,198	50,397	50,595	50,793	50,992	51,190	51,387	51,586	51,784
+10	51,982	52,180	52,378	52,576	52,774	52,972	53,169	53,367	53,564	53,762
+20	53,959	54,156	54,354	54,551	54,743	54,946	55,143	55,340	55,536	55,733
+30	55,930	56,127	56,323	56,520	56,717	56,914	57,110	57,306	57,503	57,699

+40	57,895	58,091	58,287	58,483	58,679	58,875	59,071	59,267	59,462	59,658
+50	59,854	60,050	60,245	60,440	60,635	60,831	61,026	61,221	61,416	61,611
+60	61,806	62,001	62,196	62,391	62,586	62,781	62,975	63,170	63,364	63,559
+70	63,753	63,947	64,141	64,336	64,530	64,724	64,918	65,112	65,306	65,500
+80	65,694	65,887	66,081	66,275	66,468	66,661	66,855	67,048	67,242	67,435
+90	67,628	67,821	68,014	68,207	68,400	68,593	68,786	68,979	69,171	69,364
+100	69,556	69,749	69,941	70,134	70,326	70,514	70,711	70,903	71,095	71,288
+110	71,479	71,671	71,863	72,055	72,248	72,438	72,630	72,821	73,013	73,204
+120	73,396	73,587	73,779	73,970	74,161	74,352	74,543	74,734	74,925	75,116
+130	75,306	75,497	75,688	75,879	76,069	76,259	76,450	76,640	76,831	77,021
+140	77,211	77,401	77,591	77,781	77,971	78,161	78,352	78,541	78,731	78,921
+150	79,110	79,300	79,489	79,679	79,868	80,057	80,247	80,436	80,625	80,814
+160	81,003	81,192	81,381	81,570	81,759	81,948	82,137	82,325	82,513	82,702
+170	82,890	83,079	83,267	83,455	83,644	83,832	84,020	84,208	84,396	84,584
+180	84,772	84,959	85,147	85,334	85,522	85,710	85,897	86,085	86,272	86,460
+190	86,647	86,834	87,021	87,208	87,395	87,583	87,770	87,956	88,143	88,330
+200	88,516	88,704	88,889	89,076	89,262	89,449	89,635	89,822	90,008	90,194
+210	90,380	90,566	90,752	90,938	91,124	91,309	91,495	91,681	91,867	92,052
+220	92,237	92,423	92,609	92,794	92,979	93,164	93,349	93,534	93,719	93,904
+230	94,089	94,274	94,459	94,644	94,829	95,013	95,198	95,383	95,567	95,752
+240	95,936	96,120	96,305	96,489	96,673	96,857	97,041	97,225	97,409	97,593
+250	97,776	97,960	98,143	98,327	98,510	98,694	98,877	99,061	99,244	99,427
+260	99,610	99,793	99,976	100,160	100,343	100,525	100,708	100,891	101,074	101,257
+270	101,439	101,621	101,804	101,986	102,169	102,351	102,533	102,716	102,898	103,079
+280	103,261	103,443	103,625	103,807	103,989	104,171	104,352	104,534	104,716	104,897
+290	105,079	105,260	105,441	105,622	105,803	105,985	106,166	106,347	106,528	106,709
+300	106,889	107,070	107,251	107,432	107,612	107,793	107,973	108,154	108,334	108,514
+310	108,695	108,875	109,055	109,235	109,415	109,595	109,775	109,955	110,135	110,314
+320	110,494	110,674	110,854	111,033	111,212	111,392	111,571	111,750	111,929	112,109
+330	112,288	112,467	112,646	112,825	113,003	113,182	113,361	113,540	113,718	113,897
+340	114,075	114,254	114,432	114,611	114,789	114,967	115,145	115,323	115,501	115,679
+350	115,858	116,035	116,213	116,391	116,568	116,746	116,924	117,101	117,279	117,456
+360	117,633	117,811	117,988	118,165	118,342	118,519	118,696	118,873	119,050	119,227

Темпера- тура рабочего конца, °С	Сопротивление, Ом, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
+370	119,403	119,580	119,757	119,933	120,110	120,286	120,463	120,639	120,815	120,992
+380	121,168	121,344	121,520	121,696	121,872	122,048	122,223	122,399	122,575	122,750
+390	122,926	123,102	123,277	123,452	123,628	123,803	123,978	124,153	124,328	124,504
+400	124,679	124,853	125,028	125,203	125,378	125,553	125,727	125,902	126,076	126,251
+410	126,426	126,600	126,774	126,948	127,123	127,297	127,471	127,645	127,819	127,992
+420	128,166	128,340	128,514	128,687	128,861	129,034	129,208	129,381	129,555	129,728
+430	129,901	130,074	130,247	130,420	130,593	130,766	130,939	131,112	131,285	131,457
+440	131,630	131,802	131,975	132,147	132,320	132,493	132,665	132,837	133,009	133,181
+450	133,353	133,525	133,697	133,869	134,041	134,213	134,384	134,556	134,728	134,899
+460	135,071	135,242	135,413	135,584	135,756	135,927	136,098	136,269	136,440	136,611
+470	136,782	136,953	137,123	137,294	137,465	137,635	137,805	137,976	138,146	138,316
+480	138,487	138,657	138,827	138,997	139,167	139,337	139,507	139,677	139,847	140,016
+490	140,186	140,356	140,525	140,695	140,864	141,034	141,203	141,372	141,541	141,710
+500	141,880	142,049	142,217	142,386	142,555	142,724	142,892	143,061	143,230	143,398
+510	143,567	143,735	143,905	144,072	144,240	144,408	144,576	144,744	144,912	145,080
+520	145,248	145,416	145,584	145,751	145,919	146,086	146,254	146,421	146,589	146,756
+530	146,923	147,091	147,258	147,424	147,592	147,759	147,926	148,092	148,259	148,426
+540	148,592	148,759	148,926	149,092	149,258	149,425	149,591	149,757	149,924	150,089
+550	150,255	150,422	150,588	150,755	150,919	151,085	151,251	151,416	151,581	151,747
+560	151,913	152,078	152,244	152,409	152,574	152,739	152,904	153,069	153,234	153,399
+570	153,564	153,728	153,893	154,058	154,223	154,387	154,552	154,716	154,881	155,045
+580	155,209	155,373	155,537	155,701	155,865	156,029	156,193	156,356	156,520	156,684
+590	156,847	157,011	157,174	157,337	157,500	157,664	157,827	157,991	158,154	158,317
+600	158,480	158,643	158,805	158,968	159,131	159,294	159,456	159,619	159,781	159,944
+610	160,106	160,268	160,430	160,593	160,755	160,917	161,079	161,241	161,403	161,565
+620	161,726	161,888	162,050	162,211	162,373	162,534	162,696	162,857	163,018	163,180
+630	163,341	163,502	163,662	163,823	163,984	164,144	164,305	164,466	164,626	164,786

+640	164,947	165,108	165,268	165,428	165,588	165,749	165,909	166,069	166,229	166,389
+650	166,549	166,709	166,868	167,028	167,187	167,347	167,506	167,666	167,825	167,985
+660	168,144	168,303	168,462	168,621	168,780	168,939	169,098	169,256	169,415	169,574
+670	169,732	169,891	170,049	170,208	170,366	170,525	170,683	170,841	170,999	171,157
+680	171,315	171,474	171,631	171,790	171,948	172,105	172,263	172,421	172,579	172,736
+690	172,894	173,051	173,208	173,366	173,523	173,680	173,837	173,994	174,151	174,308
+700	174,465	174,622	174,779	174,934	175,092	175,248	175,405	175,561	175,717	175,874
+710	176,030	176,187	176,343	176,499	176,655	176,811	176,967	177,122	177,278	177,434
+720	177,590	177,745	177,901	178,057	178,213	178,368	178,524	178,679	178,835	178,990
+730	179,145	179,300	179,455	179,610	179,765	179,920	180,074	180,229	180,384	180,538
+740	180,693	180,848	181,002	181,156	181,310	181,465	181,619	181,773	181,927	182,081
+750	182,235	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Значение соответственно умножается и делится на 10.

Т а б л и ц а 7.15. Номинальные статические характеристики преобразования 100 М ($R_0 = 100$ Ом); 10 М ($R_0^* = 10$ Ом) для диапазона температур от -260 до 200°C

Темпе- ратура рабочего конца, $^\circ\text{C}$	Сопротивление, Ом, для температуры, $^\circ\text{C}$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	12,160	15,850	15,420	15,000	14,590	14,190	13,780	13,380	12,970	12,560
-190	16,270	20,170	19,730	19,290	18,850	18,420	17,980	17,550	17,120	16,700
-180	20,610	24,620	24,170	23,720	23,270	22,830	22,380	21,940	21,490	21,050
-170	25,080	29,170	28,710	28,260	27,800	27,350	26,890	26,440	25,990	25,530
-160	29,620	33,720	33,270	32,810	32,360	31,900	31,450	30,990	30,530	30,080
-150	34,180	38,280	37,820	37,370	36,920	36,460	36,000	35,550	35,090	34,640
-140	38,730	42,760	42,320	41,870	41,430	40,980	40,530	40,090	39,640	39,190
-130	43,210	47,250	46,800	46,350	45,900	45,450	45,000	44,550	44,100	43,650
-120	47,690	51,710	51,260	50,820	50,370	49,930	49,480	49,030	48,590	48,140
-110	52,160	56,170	55,720	55,280	54,830	54,390	53,940	53,500	53,050	52,600
-100	56,610	60,590	60,150	59,710	59,270	58,820	58,380	57,940	57,490	57,050
-90	61,030	64,980	64,540	64,100	63,660	63,220	62,790	62,350	61,910	61,470
-80	65,420	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Температура рабочего конца, °С	Сопротивление, Ом, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-70	69,790	69,360	68,920	68,490	68,050	67,610	67,170	66,730	66,300	65,860
-60	74,150	73,710	73,280	72,850	72,410	71,970	71,540	71,100	70,670	70,230
-50	78,480	78,050	77,620	77,190	76,750	76,320	75,880	75,450	75,020	74,580
-40	82,810	82,380	81,950	81,510	81,080	80,650	80,220	79,780	79,350	78,920
-30	87,120	86,690	86,260	85,830	85,400	84,970	84,540	84,100	83,670	83,240
-20	91,420	90,990	90,560	90,130	89,700	89,270	88,840	88,410	87,980	87,550
-10	95,720	95,290	94,860	94,430	94,000	93,570	93,140	92,710	92,280	91,850
0	100,000	99,572	99,144	98,716	98,288	97,860	97,432	97,004	96,576	96,148
+10	100,000	100,428	100,856	101,284	101,712	102,140	102,568	102,996	103,424	103,852
+20	104,281	104,709	105,138	105,566	105,994	106,422	106,850	107,279	107,707	108,135
+30	108,563	108,991	109,419	109,847	110,275	110,703	111,131	111,560	111,988	112,416
+40	112,844	113,272	113,700	114,128	114,556	114,984	115,412	115,840	116,268	116,696
+50	117,124	117,552	117,980	118,408	118,836	119,264	119,692	120,120	120,548	120,976
+60	121,404	121,832	122,260	122,688	123,116	123,544	123,972	124,400	124,828	125,257
+70	125,684	126,112	126,540	126,968	127,396	127,824	128,252	128,680	129,107	129,535
+80	129,963	130,391	130,819	131,247	131,675	132,103	132,531	132,959	133,386	133,814
+90	134,242	134,670	135,098	135,526	135,954	136,382	136,810	137,238	137,666	138,094
+100	138,522	138,949	139,377	139,805	140,233	140,661	141,088	141,517	141,945	142,373
+110	142,800	143,228	143,656	144,084	144,512	144,940	145,368	145,796	146,224	146,652
+120	147,079	147,507	147,935	148,363	148,790	149,218	149,646	150,074	150,502	150,930
+130	151,357	151,785	152,213	152,641	153,069	153,497	153,924	154,352	154,780	155,208
+140	155,635	156,063	156,491	156,919	157,346	157,774	158,202	158,630	159,058	159,486
+150	159,913	160,341	160,769	161,197	161,625	162,053	162,481	162,908	163,336	163,764
+160	164,192	164,620	165,048	165,476	165,904	166,331	166,759	167,187	167,615	168,042
+170	168,470	168,898	169,326	169,754	170,182	170,610	171,037	171,465	171,893	172,321
+180	172,748	173,176	173,604	174,032	174,460	174,888	175,316	175,743	176,171	176,599
+190	177,026	177,454	177,882	178,310	178,738	179,166	179,594	180,021	180,449	180,877
+200	181,305	181,733	182,160	182,588	183,016	183,444	183,872	184,299	184,727	185,155
	185,583	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Значения делятся на 10.

Т а б л и ц а 7.16. Номинальные статические характеристики преобразования 50 М ($R_0 = 50 \text{ Ом}$) для диапазона температур от -50 до 200°C

Температура рабочего конца, $^\circ\text{C}$	Сопротивление, Ом, для температуры, $^\circ\text{C}$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	39,240	41,190	40,975	40,755	40,540	40,325	40,110	39,890	39,675	39,460
-40	41,405	43,345	43,130	42,915	42,700	42,485	42,270	42,050	41,835	41,620
-30	43,560	45,495	45,280	45,065	44,850	44,635	44,420	44,205	43,990	43,775
-20	45,710	47,645	47,430	47,215	47,000	46,785	46,570	46,355	46,140	45,925
-10	47,860	49,786	49,572	49,358	49,144	48,930	48,716	48,502	48,288	48,074
0	50,000	50,214	50,428	50,642	50,856	51,070	51,284	51,498	51,712	51,926
+10	52,140	52,354	52,569	52,783	52,997	53,211	53,425	53,639	53,853	54,067
+20	54,281	54,495	54,709	54,923	55,137	55,351	55,565	55,780	55,994	56,208
+30	56,422	56,636	56,850	57,064	57,278	57,492	57,706	57,920	58,134	58,348
+40	58,562	58,776	58,990	59,204	59,418	59,632	59,846	60,060	60,274	60,488
+50	60,702	60,916	61,130	61,344	61,558	61,772	62,086	62,200	62,414	62,628
+60	62,842	63,056	63,270	63,484	63,698	63,912	64,126	64,340	64,553	64,767
+70	64,981	65,195	65,409	65,623	65,837	66,051	66,265	66,479	66,693	66,907
+80	67,121	67,335	67,549	67,763	67,977	68,191	68,405	68,619	68,833	69,047
+90	69,261	69,474	69,688	69,902	70,116	70,330	70,544	70,758	70,972	71,186
+100	71,400	71,614	71,828	72,042	72,256	72,470	72,684	72,898	73,112	73,326
+110	73,539	73,753	73,967	74,181	74,395	74,609	74,823	75,037	75,251	75,465
+120	75,678	75,892	76,106	76,320	76,534	76,748	76,962	77,176	77,390	77,604
+130	77,817	78,031	78,245	78,459	78,673	78,887	79,101	79,315	79,529	79,743
+140	79,956	80,170	80,384	80,598	80,812	81,026	81,240	81,454	81,668	81,882
+150	82,096	82,310	82,524	82,738	82,952	83,165	83,379	83,593	83,807	84,021
+160	84,235	84,449	84,663	84,877	85,091	85,305	85,518	85,732	85,946	86,160
+170	86,374	86,588	86,802	87,016	87,230	87,444	87,658	87,871	88,085	88,299
+180	88,513	88,727	88,941	89,155	89,369	89,583	89,797	90,010	90,225	90,438
+190	90,653	90,866	91,080	91,294	91,508	91,722	91,936	92,149	92,363	92,577
+200	92,791	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Т а б л и ц а 7.17. Номинальные статические характеристики преобразования гр. 23 ($R_0 = 530 \text{ Ом}$) для диапазона температур от -50 до 180°C

[illegible]

Таблица 7.18. Номинальные статические характеристики преобразования гр. 21 ($R_0 = 46 \text{ Ом}$) для диапазона температур от -200 до 650°C

Температура рабочего конца, $^\circ\text{C}$	Сопротивление, Ом, для температуры, $^\circ\text{C}$									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-200	7,95	9,76	9,56	9,36	9,16	8,96	8,75	8,55	8,35	8,15
-190	9,96	11,75	11,55	11,36	11,16	10,96	10,76	10,56	10,36	10,16
-180	11,95	13,73	13,54	13,34	13,14	12,94	12,75	12,55	12,35	12,15
-170	13,93	15,70	15,50	15,31	15,11	14,92	14,72	14,52	14,33	14,13
-160	15,90	17,65	17,46	17,26	17,07	16,87	16,68	16,48	16,29	16,09
-150	17,85	19,59	19,40	19,21	19,01	18,82	18,63	18,43	18,24	18,04
-140	19,79	21,52	21,33	21,14	20,95	20,75	20,56	20,37	20,17	19,98
-130	21,72	23,44	23,25	23,06	22,87	22,68	22,48	22,29	22,10	21,91
-120	23,63	25,35	25,16	24,97	24,78	24,59	24,40	24,21	24,02	23,82
-110	25,54	27,25	27,06	26,87	26,68	26,49	26,30	26,11	25,92	25,73
-100	27,44	29,14	28,95	28,76	28,57	28,38	28,19	28,00	27,82	27,63
-90	29,33	31,02	30,83	30,64	30,45	30,27	30,08	29,89	29,70	29,51
-80	31,21	32,89	32,70	32,52	32,33	32,14	31,96	31,77	31,58	31,39
-70	33,08	34,76	34,57	34,38	34,20	34,01	33,83	33,64	33,45	33,27
-60	34,94	36,62	36,43	36,24	36,06	35,87	35,69	35,50	35,32	35,13
-50	36,80	38,47	38,28	38,10	37,91	37,73	37,54	37,36	37,17	36,99
-40	38,65	40,31	40,13	39,95	39,76	39,58	39,39	39,21	39,02	38,84
-30	40,50	42,15	41,97	41,79	41,60	41,42	41,24	41,05	40,87	40,68
-20	42,34	43,99	43,81	43,62	43,44	43,26	43,07	42,89	42,71	42,52
-10	44,17	45,82	45,63	45,45	45,27	45,09	44,90	44,72	44,54	44,35
0	46,00	46,18	46,37	46,55	46,75	46,91	47,09	47,28	47,46	47,64
+10	47,82	48,01	48,19	48,37	48,55	48,73	48,91	49,09	49,28	49,46
+20	49,64	49,82	50,00	50,18	50,37	50,55	50,73	50,91	51,09	51,27
+30	51,45	51,63	51,81	51,99	52,18	52,36	52,54	52,72	52,90	53,08
+40	53,26	53,44	53,62	53,80	53,98	54,16	54,34	54,52	54,70	54,88

Температура рабочего конца, °С	Сопротивление, Ом, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
+50	55,06	55,24	55,42	55,60	55,78	55,96	56,14	56,32	56,50	56,68
+60	56,86	57,04	57,22	57,39	57,57	57,75	57,93	58,11	58,29	58,47
+70	58,65	58,83	59,00	59,18	59,36	59,54	59,72	59,90	60,07	60,25
+80	60,43	60,61	60,79	60,97	61,14	61,32	61,50	61,68	61,86	62,04
+90	62,21	62,39	62,57	62,74	62,92	63,10	63,28	63,45	63,63	63,81
+100	63,99	64,16	64,34	64,52	64,70	64,87	65,05	65,22	65,40	65,58
+110	65,76	65,93	66,11	66,28	66,46	66,64	66,81	66,99	67,16	67,34
+120	67,52	67,69	67,87	68,05	68,22	68,40	68,57	68,75	68,93	69,10
+130	69,28	69,45	69,63	69,80	69,98	70,15	70,33	70,50	70,68	70,85
+140	71,03	71,20	71,38	71,55	71,73	71,90	72,08	72,25	72,43	72,60
+150	72,78	72,95	73,12	73,30	73,47	73,65	73,82	74,00	74,17	74,34
+160	74,52	74,69	74,87	75,04	75,21	75,39	75,56	75,73	75,91	76,08
+170	76,26	76,43	76,60	76,77	76,95	77,12	77,29	77,47	77,64	77,81
+180	77,99	78,16	78,33	78,50	78,68	78,85	79,02	79,19	79,37	79,54
+190	79,71	79,88	80,05	80,23	80,40	80,57	80,75	80,92	81,09	81,26
+200	81,43	81,60	81,78	81,95	82,12	82,29	82,46	82,63	82,81	82,98
+210	83,15	83,32	83,49	83,66	83,83	84,00	84,18	84,35	84,52	84,69
+220	84,86	85,03	85,20	85,37	85,54	85,71	85,88	86,05	86,22	86,39
+230	86,56	86,73	86,90	87,07	87,24	87,41	87,58	87,75	87,92	88,09
+240	88,26	88,43	88,60	88,77	88,94	89,11	89,28	89,45	89,62	89,79
+250	89,96	90,12	90,29	90,46	90,63	90,80	90,97	91,14	91,31	91,48
+260	91,64	91,81	91,98	92,15	92,32	92,49	92,66	92,82	92,99	93,16
+270	93,33	93,50	93,66	93,83	94,00	94,17	94,33	94,50	94,67	94,84
+280	95,00	95,17	95,34	95,51	95,67	95,84	96,01	96,18	96,34	96,51
+290	96,68	96,84	97,01	97,18	97,34	97,51	97,68	97,84	98,01	98,18
+300	98,34	98,51	98,68	98,84	99,01	99,18	99,34	99,51	99,67	99,84
+310	100,01	100,17	100,34	100,50	100,67	100,83	101,00	101,17	101,33	101,50

+320	101,66	101,83	101,99	102,16	102,32	102,49	102,65	102,82	102,98	103,15
+330	103,31	103,48	103,64	103,81	103,97	104,14	104,30	104,46	104,63	104,79
+340	104,96	105,12	105,29	105,45	105,61	105,78	105,94	106,11	106,27	106,43
+350	106,60	106,76	106,92	107,09	107,25	107,42	107,58	107,74	107,90	108,07
+360	108,23	108,39	108,56	108,72	108,88	109,05	109,21	109,37	109,54	109,70
+370	109,86	110,02	110,19	110,35	110,51	110,67	110,84	111,00	111,16	111,32
+380	111,48	111,65	111,81	111,97	112,13	112,29	112,46	112,62	112,78	112,94
+390	113,10	113,26	113,43	113,59	113,75	113,91	114,07	114,23	114,39	114,56
+400	114,72	114,88	115,04	115,20	115,36	115,52	115,68	115,84	116,00	116,16
+410	116,32	116,48	116,64	116,80	116,97	117,13	117,29	117,45	117,61	117,77
+420	117,93	118,09	118,25	118,41	118,57	118,73	118,89	119,04	119,20	119,36
+430	119,52	119,68	119,84	120,00	120,16	120,32	120,48	120,64	120,80	120,96
+440	121,11	121,27	121,43	121,59	121,75	121,91	122,07	122,23	122,38	122,54
+450	122,70	122,86	123,02	123,18	123,33	123,49	123,65	123,81	123,96	124,12
+460	124,28	124,44	124,60	124,76	124,91	125,07	125,23	125,39	125,54	125,70
+470	125,86	126,02	126,17	126,33	126,49	126,64	126,80	126,96	127,11	127,27
+480	127,43	127,58	127,74	127,90	128,05	128,21	128,37	128,52	128,68	128,84
+490	128,99	129,14	129,30	129,46	129,61	129,77	129,92	130,08	130,23	130,39
+500	130,55	130,70	130,86	131,02	131,17	131,33	131,48	131,63	131,79	131,95
+510	132,10	132,26	132,41	132,57	132,72	132,88	133,03	133,19	133,34	133,50
+520	133,65	133,81	133,96	134,12	134,27	134,43	134,58	134,73	134,89	135,04
+530	135,20	135,35	135,50	135,66	135,81	135,97	136,12	136,27	136,43	136,58
+540	136,73	136,89	137,04	137,19	137,35	137,50	137,65	137,81	137,96	138,11
+550	138,27	138,42	138,57	138,73	138,88	139,03	139,18	139,33	139,48	139,64
+560	139,79	139,94	140,10	140,25	140,40	140,55	140,70	140,86	141,01	141,16
+570	141,32	141,47	141,62	141,77	141,92	142,07	142,22	142,37	142,53	142,68
+580	142,83	142,98	143,13	143,28	143,44	143,59	143,74	143,89	144,04	144,19
+590	144,34	144,49	144,64	144,79	144,94	145,09	145,24	145,40	145,55	145,70
+600	145,85	146,00	146,15	146,30	146,45	146,60	146,75	146,90	147,05	147,20
+610	147,35	147,50	147,65	147,80	147,95	148,10	148,24	148,39	148,54	148,69
+620	148,84	148,99	149,14	149,29	149,44	149,59	149,74	149,89	150,03	150,18
+630	150,33	150,48	150,63	150,78	150,93	151,07	151,22	151,37	151,52	151,67
+640	151,81	151,96	152,11	152,26	152,41	152,55	152,70	152,85	153,00	153,15
+650	153,30									

Т а б л и ц а 7.19. Номинальные статические характеристики преобразования 100 П ($R_0 = 100 \text{ Ом}$); 10 П ($R_0^* = 10 \text{ Ом}$) и 1 П ($R_0^* = 1 \text{ Ом}$) для диапазона температур от 750 до 1100 °С

Температура рабочего конца, °С	Сопротивление, Ом, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
750	364,470	364,778	365,085	365,393	365,700	366,007	366,314	366,621	366,928	367,235
760	367,542	367,849	368,156	368,462	368,769	369,075	369,382	369,688	369,994	370,300
770	370,606	370,912	371,218	371,523	371,828	372,133	372,438	372,743	373,047	373,351
780	373,655	373,960	374,265	374,569	374,873	375,177	375,480	375,784	376,087	376,390
790	376,693	376,997	377,300	377,602	377,905	378,207	378,510	378,812	379,114	379,417
800	379,719	380,020	380,322	380,623	380,925	381,226	381,527	381,828	382,129	382,430
810	382,732	383,032	383,334	383,634	383,935	384,235	384,536	384,836	385,137	385,436
820	385,737	386,036	386,335	386,635	386,934	387,233	387,533	387,832	388,130	388,429
830	388,727	389,025	389,323	389,621	389,919	390,217	390,514	390,812	391,110	391,407
840	391,705	392,003	392,300	392,597	392,894	393,190	393,487	393,783	394,079	394,375
850	394,672	394,968	395,264	395,561	395,856	396,151	396,447	396,742	397,037	397,332
860	397,627	397,922	398,217	398,512	398,806	399,100	399,394	399,688	399,982	400,276
870	400,571	400,864	401,158	401,452	401,746	402,039	402,333	402,626	402,919	403,212
880	403,505	403,797	404,091	404,383	404,675	404,966	405,258	405,550	405,841	406,133
890	406,425	406,716	407,007	407,299	407,589	407,880	408,171	408,461	408,751	409,042
900	409,333	409,623	409,912	410,203	410,493	410,782	411,072	411,362	411,652	411,941
910	412,231	412,519	412,808	413,097	413,385	413,673	413,961	414,249	414,537	414,825
920	415,114	415,402	415,690	415,977	416,265	416,552	416,840	417,127	417,414	417,701
930	417,989	418,275	418,561	418,847	419,133	419,419	419,705	419,991	420,277	420,563
940	420,849	421,135	421,420	421,706	421,991	422,276	422,561	422,845	423,130	423,415
950	423,699	423,984	424,269	424,553	424,838	425,122	425,406	425,690	425,974	426,258
960	426,542	426,824	427,107	427,390	427,672	427,955	428,238	428,520	428,802	429,084
970	429,366	429,648	429,930	430,212	430,494	430,775	431,056	431,338	431,619	431,901
980	432,181	432,461	432,742	433,023	433,303	433,583	433,863	434,143	434,422	434,702
990	434,982	435,263	435,542	435,822	436,101	436,381	436,660	436,939	437,218	437,497

1000	437,776	438,054	438,332	438,611	438,888	439,166	433,444	439,722	440,000	440,277
1010	440,554	440,831	441,108	441,385	441,662	441,939	442,215	442,492	442,768	443,045
1020	443,321	443,598	443,874	444,150	444,426	444,701	444,976	445,252	445,527	445,802
1030	446,077	446,353	446,627	446,903	447,177	447,452	447,726	448,000	448,274	448,549
1040	448,823	449,097	449,371	449,645	449,918	450,191	450,464	450,737	451,009	451,282
1050	451,555	451,827	452,100	452,373	452,645	452,917	453,189	453,461	453,732	454,004
1060	454,276	454,548	454,819	455,091	455,361	455,632	455,903	456,175	456,446	456,718
1070	456,987	457,258	457,529	457,799	458,069	458,340	458,610	458,879	459,149	459,418
1080	459,688	459,957	460,226	460,495	460,764	461,033	461,302	461,571	461,839	462,107
1090	462,376	462,644	462,912	463,180	463,448	463,716	463,983	464,251	464,518	464,785
1100	465,052	465,319	465,586	465,852	466,119	466,386	466,652	466,918	467,184	467,450

* Значения делются соответственно на 10, 100.

Таблица 7.20. Номинальные статические характеристики преобразования 500 П ($R_0 = 500 \text{ Ом}$); 50 П ($R_0^* = 50 \text{ Ом}$) и 5 П ($R_0^* = 5 \text{ Ом}$) для диапазона температур от 750 до 1100 °C

Температура рабочего конца, °C	Сопротивление, Ом, для температуры, °C									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
750	182,235	182,389	182,542	182,696	182,850	183,003	183,157	183,310	183,464	183,617
760	183,771	183,924	184,078	184,231	184,384	184,537	184,691	184,844	184,997	185,150
770	185,303	185,455	189,609	185,761	185,914	186,066	186,219	186,371	186,523	186,675
780	186,827	186,980	187,132	187,284	187,436	187,588	187,740	187,892	188,043	188,195
790	188,346	188,498	188,650	188,801	188,952	189,103	189,255	189,406	189,557	189,708
800	189,859	190,010	190,161	190,311	190,462	190,613	190,763	190,914	191,064	191,215
810	191,366	191,516	191,667	191,817	191,967	192,117	192,268	192,418	192,568	192,718
820	192,868	193,018	193,167	193,317	193,467	193,616	193,766	193,916	194,065	194,214
830	194,363	194,512	194,661	194,810	194,959	195,108	195,257	195,406	195,555	195,703
840	195,852	196,001	196,150	196,298	196,447	196,595	196,743	196,891	197,039	197,187
850	197,336	197,484	197,632	197,780	197,928	198,075	198,223	198,371	198,518	198,666

Темпера- тура рабочего конца, °С	Сопротивление, Ом, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
860	198,813	198,961	199,108	199,256	199,403	199,550	199,697	199,844	199,991	200,138
870	200,285	200,432	200,579	200,726	200,873	201,019	201,166	201,313	201,459	201,606
880	201,752	201,898	202,045	202,191	202,337	202,483	202,629	202,775	202,920	203,066
890	203,212	203,358	203,503	203,649	203,794	203,940	204,085	204,230	204,375	204,521
900	204,666	204,811	204,956	205,101	205,246	205,391	205,536	205,681	205,826	205,970
910	206,115	206,259	206,404	206,548	206,692	206,836	206,980	207,124	207,268	207,412
920	207,557	207,701	207,845	207,988	208,132	208,276	208,420	208,563	208,707	208,850
930	208,994	209,137	209,280	209,423	209,566	209,709	209,852	209,995	210,138	210,281
940	210,424	210,567	210,710	210,853	210,995	211,138	211,280	211,422	211,565	211,707
950	211,849	211,992	212,134	212,276	212,419	212,561	212,703	212,845	212,987	213,129
960	213,271	213,412	213,553	213,695	213,836	213,977	214,119	214,260	214,401	214,542
970	214,683	214,824	214,965	215,106	215,247	215,387	215,528	215,669	215,809	215,950
980	216,090	216,230	216,371	216,511	216,651	216,791	216,931	217,071	217,211	217,351
990	217,491	217,631	217,771	217,911	218,050	218,190	218,330	218,469	218,609	218,748
1000	218,888	219,027	219,166	219,305	219,444	219,583	219,722	219,861	220,000	220,138
1010	220,277	220,415	220,554	220,693	220,831	220,969	221,107	221,246	221,384	221,522
1020	221,660	221,799	221,937	222,075	222,213	222,350	222,488	222,626	222,763	222,901
1030	223,038	223,176	223,313	223,451	223,588	223,726	223,863	224,000	224,137	224,274
1040	224,411	224,548	224,685	224,822	224,959	225,095	225,232	225,368	225,504	225,641
1050	225,777	225,913	226,050	226,186	226,322	226,458	226,594	226,730	226,866	227,002
1060	227,138	227,274	227,409	227,545	227,680	227,816	227,951	228,087	228,223	228,358
1070	228,493	228,629	228,764	228,899	229,034	229,170	229,305	229,439	229,574	229,709
1080	229,844	229,978	230,113	230,247	230,382	230,516	230,651	230,785	230,919	231,053
1090	231,188	231,322	231,456	231,590	231,724	231,858	231,991	232,125	232,259	232,392
1100	232,526	232,659	232,793	232,926	233,059	233,193	233,326	233,459	233,592	233,725

* Значения соответственно умножаются и делятся на 10.

Таблица 7.21. Номинальные статические характеристики преобразования 100 П ($R_0 = 100 \text{ Ом}$)

Температура рабочего конца, °C	Сопротивление, Ом, для W_{100} , равного			Температура рабочего конца, °C	Сопротивление, Ом, для W_{100} , равного		
	1,3905	1,3915	1,3920		1,3905	1,3915	1,3920
—260	0,501	0,308	0,188	—229	5,948	5,680	5,556
—259	0,527	0,332	0,212	—228	6,284	6,015	5,891
—258	0,564	0,366	0,245	—227	6,628	6,357	6,233
—257	0,607	0,406	0,284	—226	6,977	6,706	6,582
—256	0,656	0,452	0,329	—225	7,333	7,062	6,937
—255	0,714	0,507	0,382	—224	7,695	7,423	7,299
—254	0,778	0,568	0,443	—223	8,062	7,790	7,666
—253	0,852	0,639	0,513	—222	8,435	8,162	8,038
—252	0,935	0,719	0,592	—221	8,813	8,539	8,416
—251	1,028	0,809	0,681	—220	9,195	8,921	8,799
—250	1,133	0,910	0,781	—219	9,581	9,307	9,186
—249	1,249	1,024	0,897	—218	9,971	9,697	9,577
—248	1,376	1,148	1,023	—217	10,365	10,091	9,971
—247	1,516	1,284	1,164	—216	10,764	10,489	10,369
—246	1,667	1,432	1,312	—215	11,165	10,890	10,770
—245	1,830	1,592	1,472	—214	11,569	11,294	11,175
—244	2,005	1,765	1,645	—213	11,976	11,701	11,583
—243	2,192	1,949	1,829	—212	12,386	12,111	11,993
—242	2,391	2,146	2,026	—211	12,798	12,524	12,406
—241	2,602	2,354	2,234	—210	13,213	12,940	12,822
—240	2,824	2,574	2,454	—209	13,629	13,356	13,239
—239	3,058	2,806	2,686	—208	14,047	13,774	13,658
—238	3,303	3,049	2,930	—207	14,467	14,194	14,078
—237	3,558	3,303	3,183	—206	14,888	14,616	14,500
—236	3,825	3,567	3,447	—205	15,311	15,039	14,924
—235	4,101	3,841	3,717	—204	15,735	15,464	15,349
—234	4,387	4,126	4,002	—203	16,160	15,890	15,775
—233	4,682	4,419	4,295	—202	16,587	16,318	16,202
—232	4,986	4,722	4,598	—201	17,015	16,746	16,631
—231	5,299	5,033	4,909	—200	17,444	17,175	17,060
—230	5,620	5,353	5,229				

Таблица 7.22. Номинальные статические характеристики преобразования 50 П ($R_0 = 50 \text{ Ом}$)

Температура рабочего конца, °C	Сопротивление, Ом, для W_{100} , равного			Температура рабочего конца, °C	Сопротивление, Ом, для W_{100} , равного		
	1,3905	1,3915	1,3920		1,3905	1,3915	1,3920
—260	0,251	0,155	0,094	—256	0,328	0,226	0,165
—259	0,264	0,166	0,106	—255	0,357	0,253	0,191
—258	0,282	0,183	0,123	—254	0,389	0,284	0,222
—257	0,304	0,203	0,142	—253	0,426	0,320	0,257

Темпера- тура рабо- чего кон- ца, °C	Сопротивление, Ом, для W_{100} , равного			Темпера- тура рабо- чего кон- ца, °C	Сопротивление, Ом, для W_{100} , равного		
	1,3905	1,3915	1,3920		1,3905	1,3915	1,3920
—252	0,468	0,360	0,296	—225	3,667	3,531	3,469
—251	0,514	0,405	0,341	—224	3,847	3,712	3,649
—250	0,567	0,455	0,391	—223	4,031	3,895	3,833
—249	0,625	0,512	0,449	—222	4,217	4,081	4,019
—248	0,688	0,574	0,512	—221	4,406	4,270	4,208
—247	0,758	0,642	0,582	—220	4,598	4,461	4,399
—246	0,834	0,716	0,656	—219	4,790	4,654	4,593
—245	0,915	0,796	0,736	—218	4,985	4,848	4,789
—244	1,003	0,883	0,823	—217	5,182	5,046	4,986
—243	1,096	0,975	0,915	—216	5,382	5,245	5,185
—242	1,196	1,073	1,013	—215	5,582	5,445	5,385
—241	1,301	1,177	1,117	—214	5,784	5,647	5,588
—240	1,412	1,287	1,227	—213	5,987	5,851	5,791
—239	1,529	1,403	1,343	—212	6,193	6,056	5,997
—238	1,652	1,525	1,465	—211	6,399	6,262	6,203
—237	1,779	1,651	1,592	—210	6,606	6,470	6,411
—236	1,912	1,784	1,724	—209	6,815	6,677	6,620
—235	2,050	1,920	1,859	—208	7,023	6,887	6,829
—234	2,194	2,063	2,001	—207	7,233	7,097	7,039
—233	2,341	2,209	2,148	—206	7,444	7,308	7,250
—232	2,493	2,361	2,299	—205	7,656	7,520	7,462
—231	2,649	2,516	2,455	—204	7,868	7,732	7,674
—230	2,810	2,676	2,615	—203	8,080	7,945	7,888
—229	2,974	2,840	2,778	—202	8,294	8,159	8,101
—228	3,142	3,007	2,946	—201	8,508	8,373	8,316
—227	3,314	3,178	3,117	—200	8,722	8,588	8,530
—226	3,488	3,353	3,291				

Таблица 7.23. Отношение сопротивлений для медных ТС*

Температура рабочего конца, °C	W_t для 0 °C	температура рабочего конца, °C	W_t для температуры, °C	
			0	100
0	1,0000	0	1,0000	1,4260
—5	0,9787	5	1,0213	1,4473
—10	0,9574	10	1,0426	1,4686
—15	0,9361	15	1,0639	1,4899
—20	0,9148	20	1,0852	1,5112
—30	0,8935	25	1,1065	1,5325
—35	0,8722	30	1,1278	1,5538
—40	0,8509	35	1,1491	1,5751
—45	0,8296	40	1,1704	1,5964
—50	0,8083	45	1,1917	1,6177

* Интерполяционное уравнение $W_t = 1 + \alpha t$, где $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Температура рабочего конца, °C	W_t для 0 °C	Температура рабочего конца, °C	W_t для температуры, °C	
			0	100
—55	0,7870	50	1,2130	1,6390
—60	—	55	1,2343	1,6603
—65	—	60	1,2556	1,6816
—70	—	65	1,2769	1,7029
—75	—	70	1,2982	1,7242
—80	—	75	1,3195	1,7455
—85	—	80	1,3408	1,7668
—90	—	85	1,3621	—
—95	—	90	1,3834	—
—100	—	95	1,4041	—
		100	1,4260	—

Таблица 7.24. Отношение сопротивлений для никелевых ТС

Температура рабочего конца, °C	W_t для 0 °C	Температура рабочего конца, °C	W_t для температуры, °C	
			0	100
0	1,000	0	1,000	1,617
—5	0,973	5	1,028	1,652
—10	0,946	10	1,056	1,687
—15	0,919	15	1,084	1,723
—20	0,893	20	1,113	1,759
—25	0,867	25	1,142	1,796
—30	0,841	30	1,171	1,833
—35	0,816	35	1,200	1,871
—40	0,791	40	1,230	1,909
—45	0,766	45	1,260	1,948
—50	0,742	50	1,291	1,987
—55	0,718	55	1,322	2,027
—60	0,695	60	1,353	2,067
—65	—	65	1,385	2,108
—70	—	70	1,417	2,149
—75	—	75	1,449	2,190
—80	—	80	1,482	2,231
—85	—	85	1,515	—
—90	—	90	1,540	—
—95	—	95	1,583	—
—100	—	100	1,617	—

Т а б л и ц а 7.25. Отношение сопротивлений для платиновых ТС при $W_{100} = 1,3856^*$

Температура рабочего конца, °C	W_t для температуры, °C									
	0	—5	—10	—15	—20	—25	—30	—35	—40	—45
—100	0,6025	0,5823	0,5619	0,5415	0,5211	0,5006	0,4800	0,4594	0,4387	0,4180
0	1,0000	0,9805	0,9609	0,9413	0,9216	0,9019	0,8822	0,8625	0,8427	0,8229

Температура рабочего конца, °C	W_t для температуры, °C										
	—50	—55	—60	—65	—70	—75	—80	—85	—90	—95	—100
—100	0,3971	0,3763	0,3553	0,3343	0,3132	0,2920	0,2708	0,2495	0,2280	0,2065	0,1849
0	0,8031	0,7832	0,7633	0,7433	0,7234	0,7033	0,6833	0,6631	0,6430	0,6228	0,6025

Температура рабочего конца, °C	W_t для температуры, °C									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
0	1,0000	1,0195	1,0390	1,0585	1,0779	1,0973	1,1167	1,1361	1,1554	1,1747
100	1,3850	1,4039	1,4229	1,4418	1,4606	1,4794	1,4982	1,5170	1,5358	1,5545
200	1,7584	1,7768	1,7951	1,8134	1,8317	1,8499	1,8682	1,8863	1,9045	1,9226
300	2,1202	2,1380	2,1557	2,1735	2,1912	2,2088	2,2265	2,2441	2,2617	2,2792
400	2,4704	2,4876	2,5048	2,5219	2,5390	2,5561	2,5732	2,5902	2,6072	2,6242
500	2,8090	2,8256	2,8422	2,8588	2,8753	2,8918	2,9083	2,9247	2,9411	2,9575
600	3,1359	3,1520	3,168	3,1840	3,1999	3,2159	3,2318	3,2476	3,2635	3,2793
700	3,4513	3,4668	3,4822	3,4976	3,5130	3,5284	3,5437	3,5590	3,5743	3,5895
800	3,7551	3,7700	3,7848	3,7997	3,8145	3,8292	3,8440	3,8587	3,8734	3,8880

Температура рабочего конца, °C	W _t для температуры, °C										
	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
0	1,1940	1,2132	1,2324	1,2516	1,2707	1,2898	1,3089	1,3280	1,3470	1,3660	1,3850
100	1,5732	1,5918	1,6104	1,6290	1,6476	1,6661	1,6847	1,7031	1,7216	1,7400	1,7584
200	1,9407	1,9588	1,9769	1,9949	2,0129	2,0308	2,0488	2,0667	2,0845	2,1024	2,1202
300	2,2967	2,314	2,3317	2,3491	2,3665	2,3839	2,4013	2,4186	2,4359	2,4531	2,4704
400	2,6411	2,6580	2,6749	2,6918	2,7086	2,7254	2,7422	2,7589	2,7756	2,7923	2,8090
500	2,9739	2,9902	3,0065	3,0228	3,0390	3,0553	3,0715	3,0876	3,1038	3,1199	3,1359
600	3,2951	3,3108	3,3266	3,3423	3,3579	3,3736	3,3892	3,4048	3,4203	0,4358	3,4513
700	3,6047	3,6198	3,6350	3,6501	3,6652	2,6802	3,6953	3,7103	3,7252	3,7402	3,7551
800	3,9026	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Интерполяционное уравнение для диапазона измеряемых температур: от —200 до 0 °C — $W_t = 1 + At + Bt^2 + C[t - t_{100}]t^3$; от 0 до 850 °C — $W_t = 1 + At + Bt^2$, где $A = 3,90302 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$; $B = 5,8020 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$; $C = 4,274 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$.

Таблица 7.26. Отношение сопротивлений для платиновых ТС при $W_{100} = 1,3910^*$

Темпера- тура ра- бочего конца, °C	W_t для температуры, °C									
	0	—5	—10	—15	—20	—25	—30	—35	—40	—45
—100	0,5964	0,5758	0,5552	0,5345	0,5137	0,4929	0,4721	0,4511	0,4302	0,4091
0	1,0000	0,9801	0,9603	0,9403	0,9204	0,9001	0,8804	0,8604	0,8403	0,8202

Темпера- тура ра- бочего конца, °C	W_t для температуры, °C										
	—50	—55	—60	—65	—70	—75	—80	—85	—90	—95	—100
—100	0,3880	0,3668	0,3456	0,3243	0,3029	0,2814	0,2599	0,2382	0,2165	0,1947	0,1729
0	0,8000	0,7798	0,7596	0,7394	0,7191	0,6987	0,6784	0,6580	0,6375	0,6170	0,5964

Темпера- тура ра- бочего конца, °C	W_t для температуры, °C									
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45
0	1,0000	1,0198	1,0396	1,0594	1,0791	1,0989	1,1185	1,1382	1,1578	1,1774
100	1,3910	1,4102	1,4295	1,4486	1,4678	1,4869	1,5060	1,5251	1,5441	1,5631
200	1,7703	1,7889	1,8075	1,8262	1,8447	1,8632	1,8818	1,9002	1,9187	1,9371
300	2,1378	2,1559	2,1739	2,1919	2,2099	2,2278	2,2458	2,2637	2,2815	2,2994
400	2,4936	2,5111	2,5285	2,5489	2,5633	2,5807	2,5980	2,6153	2,6326	2,6499
500	2,8376	2,8545	2,8714	2,8882	2,9051	2,9218	2,9386	2,9553	2,9720	2,9886
600	3,1700	3,1863	3,2026	3,2188	3,2350	3,2512	3,2674	3,2835	3,2996	3,3157
700	3,4906	3,5063	3,5220	3,5376	3,5533	3,5689	3,5844	3,6070	3,6155	3,6310
800	3,7984	3,8145	3,8297	3,8447	3,8598	3,8748	3,8898	3,9047	3,9197	3,9344

Темпера- тура ра- бочего конца, °C	W_t для температуры, °C										
	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
0	1,1970	1,2165	1,2360	1,2555	1,2749	1,2944	1,3137	1,3331	1,3524	1,3717	1,3910
100	1,5821	1,6011	1,6200	1,6389	1,6577	1,6766	1,6954	1,7141	1,7329	1,7516	1,7703
200	1,9555	1,9739	1,9922	2,0105	2,0288	2,0470	2,0652	2,0834	2,1016	2,1197	2,1378
300	2,3172	2,3349	2,3527	2,3704	2,3881	2,4057	2,4234	2,4410	2,4585	2,4761	2,4936
400	2,6671	2,6843	2,7014	2,7186	2,7357	2,7527	2,7698	2,7868	2,8038	2,8207	2,8376
500	3,0053	3,0219	3,0384	3,0550	3,0715	3,0880	3,1044	3,1209	3,1373	3,1536	3,1700
600	3,3317	3,3473	3,3637	3,3797	3,3956	3,4115	3,4274	3,4432	3,4590	3,4748	3,4906
700	3,6465	3,6619	3,6773	3,6926	3,7080	3,7233	3,7386	3,7538	3,7691	3,7842	3,7994
800	3,9494	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Интерполяционное уравнение для диапазона измеряемых температур: от —20 до 0 °C — $W_t = 1 + At + Bt^2 + C[t - t_{100}] \cdot t^3$; от 0 до 850 °C — $W_t = 1 + At + Bt^2$, где $A = 3,96868 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$; $B = 5,8677 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-2}$; $C = 4,141 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$.

8.1. Термоэлектрические явления. Термопары

Действие ПТ основано на эффекте Зеебека — одном из 12 термоэлектрических явлений, известных в современной физике твердого тела. В упрощенном и достаточно строгом представлении ограничиваются следующими тремя термоэлектрическими явлениями.

Эффект Зеебека (1826 г.) — в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных различных проводников, возникает термоЭДС, если в местах контактов поддерживается различная температура. В простейшем случае, когда такая цепь состоит из двух различных проводников, она называется термопарой (составная часть ПТ). ТермоЭДС термопары зависит от температуры рабочего (измерительного) и свободного (опорного) спая и от состава материала проводников, образующих термопару.

В небольшом диапазоне температур термоЭДС можно считать, с достаточной для практических целей точностью, пропорциональной разности температур и коэффициенту термоЭДС (более точно α — функция разности температур спаев): $\alpha = \Delta E / \Delta T$. Коэффициент термоЭДС зависит, в первую очередь, от материала термоэлектродов, а также от диапазона температур, в котором используется термопара; в некоторых случаях с изменением температуры α изменяет знак.

Создание цепей, состоящих из различных проводников, позволяет экспериментально определить коэффициент термоЭДС проводника А относительно проводника В:

$$\alpha_A - \alpha_B = \lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{\Delta E_A - \Delta E_B}{\Delta T}.$$

В основных представлениях удобно пользоваться абсолютным удельным коэффициентом термоЭДС данного проводника, который можно определить, если данный проводник в паре с абсолютным термоэлектродом, не обладающим термоэлектрическим эффектом. Таким абсолютным термоэлектродом может быть любой сверхпроводник. Температурный диапазон существования сверхпроводников узок по сравнению с диапазоном температур, в котором применение ПТ эффективно. Поэтому абсолютные удельные коэффициенты термоЭДС определяют косвенно, по измеренной теплоте Пельтье или Томсона.

Эффект Пельтье (1834 г.) — в месте контакта разных проводников А и В в дополнение к теплоте Джоуля выделяется или поглощается (в зависимости от направления тока) количество теплоты (теплота Пельтье), пропорциональное силе протекающего электрического тока и времени: $Q_\pi = \pi_{AB} I t$.

Обратимое выделение или поглощение теплоты Пельтье зависит только от свойств каждого проводника термопары, т.е. от абсолютных коэффициентов Пельтье каждого из проводников. В температурных измерениях это явление может играть существенную роль только при достаточно больших удельных плотностях электрических токов в измерительных цепях.

Эффект Томсона (установленный экспериментально Леру в 1867 г.) — если вдоль проводника, по которому протекает электрический ток, существует градиент температуры, то в дополнение к теплоте Джоуля в объеме проводника выделяется или поглощается (в зависимости от направления тока) количество теплоты (теплота Томсона), пропорциональное силе тока, времени, градиенту температуры и коэффициенту Томсона (зависящему от природы материала проводника): $Q_a = \sigma \Delta T t$.

Применив к трем указанным термоэлектрическим явлениям первое и второе начало термодинамики, Томсон (1856 г.) вывел следующие соотношения: $\sigma = T d\alpha/dT$, $\pi = T\alpha$.

Абсолютный удельный коэффициент термоЭДС. Явление Томсона по своей природе абсолютно, что позволяет по измеренным значениям коэффициента Томсона найти абсолютные значения коэффициентов Пельтье и Зеебека. Последний получается интегрированием

$$\text{уравнения } \sigma = T\alpha/dT : \alpha(T) = \int_0^T \frac{\sigma}{T} dT.$$

Наличие информации об абсолютном удельном коэффициенте термоЭДС хотя бы для материала одного проводника открывает возможность привязки к абсолютной системе отсчета всех данных относительных измерений. В качестве такого эталона при низких температурах принимается свинец (табл. 8.1), при средних и высоких температурах — платина. Однако чистые медь, серебро, золото и вольфрам имеют низкий абсолютный удельный коэффициент термоЭДС и могут оказаться предпочтительнее платины (табл. 8.2). В практике измерений платина получила широкое применение благодаря ряду положительных свойств, связанных с возможностью получения и сохранения высокой

Таблица 8.1. Удельный коэффициент термоЭДС чистого свинца в диапазоне температур от 0 до 293 К

<i>T</i> , К	<i>S</i> , мкВ/К	<i>T</i> , К	<i>S</i> , мкВ/К	<i>T</i> , К	<i>S</i> , мкВ/К
0	0	18	—0,78	113,2	—0,91
5	0	20	—0,78	133,2	—0,96
7,5	—0,22	30	—0,77	153,2	—1,02
8	—0,25	40	—0,76	173,2	—1,06
8,5	—0,29	50	—0,77	193,2	—1,10
9	—0,34	60	—0,77	213,2	—1,15
10	—0,43	70	—0,78	233,2	—1,18
11	—0,51	80	—0,79	253,2	—1,21
12	—0,59	90	—0,82	273,2	—1,25
14	—0,70	100	—0,86	293,2	—1,27
16	—0,77				

Таблица 8.2. Удельный коэффициент термоЭДС чистых металлов в диапазоне температур от 100 до 2400 К

Т, К	S, мкВ/К, для металлов						
	Cu	Ag	Au	Pt	Pd	W	Mo
100	1,19	0,73	0,82	4,20	2,00	—	—
150	1,12	0,85	1,02	1,32	—1,63	—	—
200	1,29	1,05	1,34	—1,27	—4,85	—	—
273	1,70	1,38	1,79	—4,45	—9,00	0,13	4,71
300	1,83	1,51	1,94	—5,28	—9,99	1,07	5,57
400	2,34	2,08	2,46	—7,83	—13,00	4,44	8,52
500	2,83	2,82	2,86	—9,89	—16,03	7,58	1,12
600	3,33	3,72	3,18	—11,06	—19,06	10,29	13,27
700	3,83	4,72	3,43	—13,31	—22,09	12,66	14,94
800	4,34	5,77	3,63	—14,88	—25,12	14,65	16,13
900	4,85	6,85	3,77	—16,39	—28,15	16,28	16,86
1000	5,36	7,95	3,85	—17,86	—31,18	17,57	17,16
1100	5,88	9,06	3,88	—19,29	—34,21	18,63	17,08
1200	6,40	10,15	3,86	—20,69	—37,24	19,18	16,65
1300	6,91	—	3,78	—22,06	—40,27	19,58	15,92
1400	—	—	—	—23,41	—43,30	19,60	14,94
1600	—	—	—	—26,06	—49,36	18,97	12,42
1800	—	—	—	—28,66	—55,42	17,41	9,52
2000	—	—	—	—31,23	—61,48	15,05	6,67
2200	—	—	—	—	—	12,01	4,30
2400	—	—	—	—	—	8,39	2,87

степени чистоты. Поэтому термоэлектрические характеристики многих металлов были исследованы относительно платины (табл. 8.3).

Технические возможности ПТ. Термоэлектрические преобразователи удовлетворяют многим требованиям идеального преобразователя. Они просты, надежны в работе и состоят, по существу, из двух термоэлектродов. Их конструктивные формы позволяют обеспечивать малый показатель тепловой инерции. Выбирая соответствующие материалы термоэлектродов, можно проводить измерения температур в широком диапазоне (от 2 до 3000 К). При этом достигается высокая точность преобразования (инструментальная погрешность до 0,01 К) и высокая чувствительность (до 100 мкВ/К). ПТ представляют собой идеальные приборы для измерения разностей температур, величины которых в отдельных случаях могут доходить до 10^{-7} К. Если материалы термоэлектродов однородны, изотропны и не претерпевают физических или химических изменений, то зависимость термоЭДС ПТ от температуры хорошо воспроизводима. В связи с этим преобразователи, термопары которых изготовлены из одной и той же партии термоэлектродов, могут быть полностью взаимозаменяемы.

Основные правила обращения с термоэлектрическими цепями.

Правило Магнуса. ТермоЭДС, возникающая в замкнутой цепи, которая образована парой однородных, изотропных проводников, зависит только от температуры спаев и не зависит от распределения температуры по длине проводников.

Правило аддитивности показаний по температуре. Если имеется возрастающая последовательность температур изотермических про-

странств $T_1 > T_2 > T_3$, то при измерении их парой термоэлектродов $A-B$ действует следующее правило аддитивности:

$$E_{AB}(T_1, T_2) + E_{AB}(T_2, T_3) = E_{AB}(T_3, T_1).$$

Правило аддитивности показаний по материалам. Если для измерения разности температур ($T_1 - T_2$) имеется некоторая последовательность термоэлектродных материалов $A-B-C$, то справедливы следующие соотношения:

$$E_{AB}(T_1, T_2) + E_{BC}(T_1, T_2) = E_{AC}(T_1, T_2);$$

$$E_{AB} = -E_{BA}, E_{AC} = -E_{CA} \text{ и т. д.}$$

Из последних двух правил следует общее правило конструирования термоэлектрических измерительных цепей: неоднородность проводника допустима только в изотермической области и, наоборот, неизотермичность допустима только в однородном проводнике. Недопустимо сочетание неоднородности и неизотермичности. Поэтому при введении в цепь термопары прибора для измерения термоЭДС необходимо обеспечить его изотермичность.

Примеси и неоднородность термоэлектродных материалов (термоэлектрическая неоднородность). Каждый идеально чистый проводник имеет собственную термоЭДС. Наличие в проводнике даже минимального количества примесей заметно влияет на ее значение. Таким образом, наличие примесей неизбежно приводит к невоспроизводимости результатов измерений.

Помимо примесей проводники обычно имеют структурные дефекты (точечные дефекты, границы зерен, дислокации). Если примеси и дефекты распределены в термоэлектроде неравномерно, то они практически образуют внутри термоэлектрода диполи. При наличии градиента температуры они влияют на значение термоЭДС, любые последующие изменения распределения температуры в этой области могут привести к расхождению показаний.

Химические неоднородности характеризуются непостоянством химического состава по объему термоэлектрода. Они могут возникнуть в термоэлектроде в результате реакций выделения новых фаз или избирательного испарения компонентов сплава. Кроме того, они могут вызываться взаимодействием с окружающей средой. Физические неоднородности характеризуются непостоянством фазового состава, нарушением упорядоченности, изменением структуры зерен по объему термоэлектрода и колебаниями концентрации дефектов кристаллической решетки.

Естественно, что все процессы внутренних изменений в термоэлектроде (распад твердых растворов, коагуляция примесей, образование новых фаз, межграницная диффузия) сопровождаются термоструктурными напряжениями, что приводит к изменению термоЭДС.

Методы измерения термоэлектрической неоднородности проволоки разделяют на контактные и бесконтактные. **Контактные** — метод скрутки, скользящего контакта, пружинного контакта и захвата, **бесконтактные** — метод точечной печи, асимметричного нагревателя, двух сред, магнитный и термографический. Методы скрутки и скользящего контакта не применяются из-за большой неопределенности результатов измерений; эти методы имеют лишь исторический интерес.

В методе пружинного контакта в качестве электрода сравнения используют отрезок проволоки из того же материала, что и испытуемая проволока. Рабочий конец электрода сравнения изгибают в виде «капли». При циклическом протягивании проволоки через отверстие

Т а б л и ц а 8.3. Физико-технические характеристики термоэлектродных

Материал	ТермоЭДС относительно платины, мкВ/К	Предельная температура, °С			Температура плавления, °С
		для ТС	для термопар		
			длитель- ная	кратко- временная	
Алюминий	+4,0	—	—	—	658
Алюмель	—	—	—	—	—
95 % Ni + 5% (Al, Si, Co, Mn)	—(10,2 ... 13,8)	—	1000	1250	1450
Висмут	—(58,4 ... 73,0)	—	—	—	270
Вольфрам	+7,9	—	2000	2500	3367
Железо химически чи- стое	+18,0	150	600	800	1528
Железо поделочное	+18,7	—	600	800	1400
Золото	+8,0	—	—	—	1063
Иридий	+6,5	—	—	—	2350
Константан	—	—	—	—	—
52 % Cu + 48 % Ni	—35,0	—	600	800	1220—1280
Копель	—	—	—	—	—
55 % Cu + 45 % Ni	—40,0	—	600	800	1250
Кремний	+448	—	—	—	—
Кадмий	+9	—	—	—	321
Кобальт	—(16,8 ... 17,6)	—	—	—	1478
Молибден	+13,1	—	2000	1500	3000
Медь химически чистая	+7,6	150	350	500	1083
Медь проводниковая	+7,5	150	350	500	—
Манганин 84 % Cu + + 13 % Mn + 2% Ni + + 1 % Fe	+8,0	—	—	—	910
Магний	+4,1	—	—	—	644
Нихром	—	—	—	—	—
80 % Ni + 20 % Cr	+(15 ... 25)	—	1000	1100	1500
Никель	—(15,0 ... 15,4)	300	1000	1100	1455
Олово	+4,3	—	—	—	232
Платина «Экстра»	+0,00	660	1300	1600	1779
Платинородий	—	—	—	—	—
70 % Pt + 30 % Rh	+6,4	—	1600	1800	—
87 % Pt + 13 % Rh	+6,46	—	1300	1600	—
90 % Pt + 10 % Rh	+13,0	—	1000	120	—
Палладий	—5,7	—	—	—	1553
Пирит	+121	—	—	—	—
Родий	+6,4	—	—	—	1967
Ртуть	+0,4	—	—	—	38,87
Сурьма	+48,6	—	—	—	630,5
Свинец	+4,4	—	—	—	327
Серебро	+7,2	—	600	700	960,5
Сплав 60 % Au + + 30 % Pd + 10 % Pt	—23,1	—	1200	1300	1430
Теллур	+500	—	—	—	300 ... 452

материалов

γ , г/см ³	β , 10 ⁻⁶ 1/К	c , кДж/кг·К	λ , Вт/м·К	$\rho \cdot 10^3$, см·м	α , 10 ⁻⁸ 1/К
2,7	23,8	0,699	203	0,25 ... 0,278	4,3
8,5	15,1	0,942	—	0,33 ... 0,35	1,0
9,8	13,7	0,125	9,75	1,30 ... 1,48	4,45 ... 4,54
19,1	3,36	0,141	157	0,055 ... 0,0612	4,21 ... 4,04
7,86	11	0,502	46,4	0,0907	6,25 ... 6,57
7,8	13	0,502	46,4—58	0,1	4 ... 6
19,25	14,3	0,131	308	0,022	3,97
—	6,58	0,243	—	—	3,93
8,9	15,2	0,410	23,2	0,45 ... 0,5	0,04
9,0	15,6	—	—	0,49	—0,1
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
8,8	12,3	0,435	63,8	0,097	3,66 ... 6,56
9,0	5,1	0,272	—	0,0438 ... 0,0476	4,35
8,95	16,5	0,392	394	0,0156 ... 0,0168	4,33
8,9	16,4	0,392	348 ... 394	0,017	4,25 ... 4,28
8,4	—	—	—	0,42	0,006
1,74	26	1,048	157	0,0436	3,9
8,2	17	—	—	0,95 ... 1,05	0,14
8,75	22,8	0,451	58	0,118 ... 0,138	6,21 ... 6,34
7,4	26,7	0,236	63,8	0,143	4,4
21,32	8,99	0,134	68,4	0,0981 ... 0,106	3,84
—	—	—	—	0,190	1,95
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	8,58	0,243	—	—	4,43
13,6	18,4	0,138	8,12	0,943	0,96
—	9,7	0,209	22,1	—	4,73
11,3	27,6	0,132	34,8	0,227	4,11
10,5	19,5	0,239	417	0,0147	4,1
—	—	—	—	0,34	0,2
6,24	27,2	0,202	—	—	3,79

Материал	ТермоЭДС относительно платины, мкВ/К	Предельная температура, °С			Температура плавления, °С
		для ТС	для термопар		
			длитель- ная	кратко- временная	
Тантал	+5,1	—	—	—	2800
Уголь	+3,0	—	—	—	—
Хромель (89 % Ni + + 9,8 % Cr + 1%Fe + + 0,2 % Mn)	+ (27,1 ... 31,3)	—	1000	1250	1450
Цинк	+7,0	—	—	—	419,5
Натрий	—2,1	—	—	—	—
Калий	—9,4	—	—	—	—
Сульфид молибдена	—770	—	—	—	—
Окись цинка	—710	—	—	—	—
Окись меди	—696	—	—	—	—
Закись меди	+1000	—	—	—	—
Закись железа	—500	—	—	—	—
Окись-закись железа	—430	—	—	—	—
Окись железа	—56	—	—	—	—
Окись никеля	+240	—	—	—	—
Окись марганца	+385	—	—	—	—

по оси нагреваемого цилиндрического или прямоугольного медного блока электрод сравнения, ось которого перпендикулярна поверхности протягиваемой проволоки, опускается на поверхность испытуемой проволоки и прижимается к ней пружиной. По регистрируемым значениям термоЭДС судят о степени однородности испытуемой проволоки. Метод дает хорошую воспроизводимость результатов измерений только тогда, когда проволока не имеет окисной пленки при температуре испытаний.

Метод захвата используют в заводской практике для контроля неоднородности платиновых и платинородиевых проволок. На участки испытуемой проволоки накладывают через каждые 2—5 м температурное поле специальной трубчатой печи, имеющей отверстие в кожухе, которое позволяет опускать на испытуемую проволоку перпендикулярно ее поверхности образец сравнения, представляющий собой отрезок проволоки из того же материала, что и испытуемая, с концом, загнутым в виде крючка. Этим крючком захватывают испытуемую проволоку и подтягивают ее вверх, создавая тем самым хороший тепловой и электрический контакт между участком проволоки, находящимся в печи, и образцом сравнения. Этот метод применим лишь для проволок с неокисленной поверхностью. При подтягивании проволоки на ее сгибаемом участке создается дополнительная неоднородность, что искажает результаты измерений. Кроме того, изменяется термоэлектрическая характеристика образца сравнения, находящегося в печи при температуре испытаний выше 800 °С.

Контактные методы измерения термоэлектрической неоднородности проволок являются методами разрушающего контроля, поскольку из-за стремления получить хороший тепловой и электрический кон-

$\gamma, \text{r/см}^3$	$\beta, 10^{-6} \text{ 1/K}$	$\sigma, \text{кДж/кг} \cdot \text{K}$	$\lambda, \text{Вт/м} \cdot \text{K}$	$\rho \cdot 10^6, \text{см} \cdot \text{м}$	$\alpha, 10^{-3} \text{ 1/K}$
—	6,6	0,138	81,3	0,065	3,5
—	—	—	—	—	—
8,7	16,1	—	—	0,7	0,5
6,86	28,3	4,01	110	0,082	3,9
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—

такт образца сравнения и испытуемой проволоки возникает неизбежная дополнительная деформация испытуемой проволоки в месте контакта. Такая деформация вносит в результаты измерений значительную неопределенность. Существенным недостатком контактных методов является и невозможность использования их для проволок с окисленной поверхностью.

В методе точечной печи на участки проволоки, движущейся с постоянной скоростью, накладывается температурное поле трубчатой печи малой длины в форме равнобедренного треугольника. ТермоЭДС неоднородности в этом методе представляет собой разность термоЭДС неоднородности участка проволоки, находящегося в поле положительного градиента температуры и термоЭДС неоднородности участка проволоки, находящегося в поле отрицательного градиента температуры, т.е. в каждый момент измерений на концах испытуемой проволоки возникает термоЭДС, характеризующая различие неоднородностей двух близлежащих участков по длине проволоки. Хотя данным методом можно испытывать проволоки с различной степенью окисленности поверхности, точность метода мала из-за отсутствия постоянного образца сравнения по неоднородности.

Метод асимметричного нагревателя отличается от метода точечной печи распределением температуры на испытуемой проволоке, т.е. использованием печи, температурное поле которой имеет большой градиент температуры на малом участке проволоки и малый градиент температуры на большом участке проволоки (рис. 8.1). В каждый момент измерений на концах испытуемой проволоки возникает термоЭДС, характеризующая различие неоднородностей малого и большого участков по длине проволоки. Так как термоЭДС неоднородности большого

участка проволоки, будучи интегральной величиной, слабо изменяется в процессе движения проволоки, то большой участок проволоки может служить электродом сравнения. С учетом этого точность метода по сравнению с методом точечной печи выше.

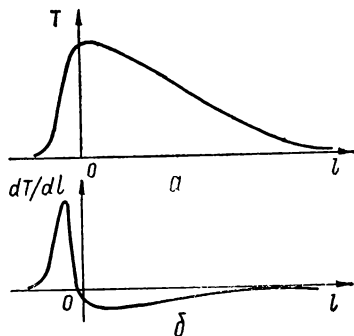


Рис. 8.1. Температурное поле по оси асимметричного нагревателя: а — распределение температуры; б — распределение градиента температуры.

диаграммной ленте самопишущего потенциометра после предварительного усиления. В каждый момент измерений на концах испытуемой проволоки и электрода сравнения возникает термоЭДС, характеризующая различие неоднородностей участка испытуемой проволоки и постоянного электрода сравнения (обычно им служит отрезок проволоки от испытуемой бухты). Неизменность электрода сравнения увеличивает точность метода по сравнению с методом асимметричного нагревателя.

В методе двух сред используется установка, реализующая две среды (жидкий азот — воздух) без применения контактных систем. В этом удачном решении съема сигнала термоЭДС неоднородности механизм передвижения испытуемой проволоки выполнен в виде приемного и подающего поводков (рис. 8.2), вращающихся вокруг осей неподвижных катушек. Привод подающего поводка снабжен фрикционной муфтой. Недостатком установки является ее пригодность только для «упругих» проволок диаметром 0,3—0,6 мм, так как при перемотке проволоки вносится дополнительная неоднородность, вызванная перегибами проволоки в поводках.

Магнитный метод измерения неоднородности проволок применяют только для качественного определения неоднородности проволоки. В сущности, при испытаниях определяют неоднородность магнитных свойств по длине проволоки, однако опыт применения этого метода для обнаружения термоэлектрической неоднородности проволок

В методе двух сред используют воздействие на испытуемую проволоку и электрод сравнения градиента температуры двух сред: воздуха и жидкого азота. Приемную катушку с предварительно укрепленными в ее контактной системе концами испытуемой проволоки и электрода сравнения помещают в термостатную ванну с жидким азотом, а подающую катушку с намотанной на ней испытуемой проволокой укрепляют на крышке ванны. Поверхность крышки находится при комнатной температуре. Сигнал термоЭДС неоднородности снимают при помощи контактных систем, а ее регистрация осуществляется на

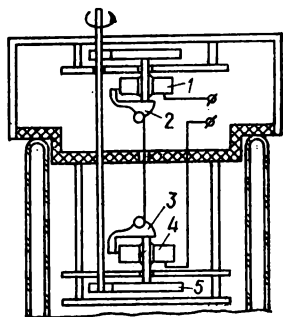


Рис. 8.2. Схема установки для измерения термоэлектрической неоднородности проволок, реализующей метод двух сред без применения контактных схем:

1, 4 — катушки; 2 — подающий поводок; 3 — приемник; 5 — фрикционная муфта.

из ферромагнитных материалов позволяет утверждать, что неоднородная в магнитном отношении проволока неоднородна и термоэлектрически. Определение какой-либо зависимости между вариациями магнитных свойств проволоки и вариациями ее термоэлектрической неоднородности представляет в настоящее время нерешенную проблему физики твердого тела, поэтому применение этого метода для метрологической оценки термоэлектрической неоднородности преждевременно.

Для измерения неоднородности проволок в СССР создана установка УИН-1. Оценку термоэлектрической неоднородности выполняют по результатам измерений разности термоЭДС, возникающей под действием перепада температур от комнатной до температуры кипения жидкого азота на постоянном участке образца сравнения и участках испытываемой проволоки. Конструктивно установка выполнена в виде трех отдельных блоков: системы фотокомпенсационный усилитель — самопишущий потенциометр, пульта управления и термостатной ванны с механизмом передвижения испытываемой проволоки. Блок-схема установки представлена на рис. 8.3. Для проведения измерений от бухты испытываемой проволоки отрезают два отрезка, один из которых используют в качестве образца сравнения, другой — в качестве соединительного проводника. Оба отрезка — образец сравнения и соединительный проводник — прикрепляют к наконечникам контактных систем 14 и 6 соответственно.

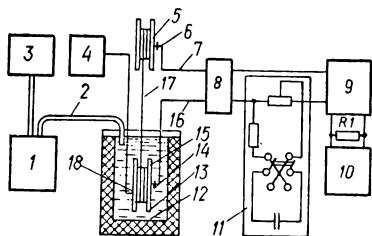


Рис. 8.3. Блок-схема установки УИН-1:

1 — сосуд Дьюара; 2 — патрубок; 3 — микрокомпрессор; 4 — двигатель; 5 — подающий барабан; 6, 14 — контактная система; 7 — соединительный проводник; 8 — коробка свободных концов; 9 — усилитель; 10 — самопишущий потенциометр; 11 — блок регулирования смещения; 12 — ванна термостата; 13 — жидкий азот; 15 — приемный барабан; 16 — образец сравнения; 17 — испытываемая проволока; 18 — червячная пара.

Вторые концы отрезков термостатируют в коробке свободных концов. Один конец испытываемой проволоки закрепляют в стержне контактной системы 6, и бухта проволоки, подлежащая испытанию, наматывается на подающий барабан. Затем второй конец проволоки закрепляют в стержне контактной системы 14 приемного барабана. При движении испытываемой проволоки, осуществляемом с помощью двигателя через червячную пару, на каждый участок проволоки накладывается поле градиента температуры, существующего на границе перепада температуры от комнатной до температуры кипения жидкого азота (на границе раздела воздуха и зеркала жидкого азота). Вследствие этого на концах образца сравнения и соединительного проводника возникает в каждый момент движения испытываемой проволоки разность потенциалов, характеризующая разность термоЭДС на участке проволоки и на постоянном участке образца сравнения. Сигнал разности усиливается усилителем типа Ф116/1 и затем подается на вход самопишущего потенциометра, на диаграммной ленте которого регистрируется и сигнал разности термоЭДС.

Для поддержания уровня жидкого азота в термостатной ванне жидкий азот подается из сосуда Дьюара через патрубок при помощи избыточного давления, создаваемого в сосуде микрокомпрессором. Блок регулирования смещения служит для изменения положения пера на диаграммной ленте самопишущего потенциометра, а также

для подачи калибровочного сигнала (15 мкВ) в измерительную цепь. После регистрации значений термоЭДС неоднородности испытуемой проволоки проводят статистическую обработку данных, заключающуюся в определении корреляционной функции термоЭДС неоднородности проволоки бухты, гистограммы ее распределения вероятностей и других статистических параметров.

Основные технические характеристики установки УИН-1 следующие:

Диапазон измерений, мкВ	1,5...100
Дрейф показаний установки после 60 мин прогрева, мкВ/ч, не более	2
Скорость передвижения испытуемой проволоки, мм/с	10
Шумовое напряжение в контактных системах, мкВ, не более	0,6
Расход жидкого азота на испытание 100 м проволоки, л, не более	30
Соппротивление нагрузки Ф 116/1, Ом, не более	10
Погрешность измерения термоЭДС неоднородности, мкВ, не более	$\pm 0,75$

Нестабильность характеристик термоэлектродов. Нестабильность термоЭДС не является погрешностью в прямом смысле этого слова, хотя в большинстве случаев она служит главной ее причиной.

Основными факторами, обуславливающими нестабильность термоЭДС, являются химические и физические неоднородности одного или обоих термоэлектродов в поле градиента температуры, вызванные примесями, попадающими из окружающей среды или защитных оболочек; в результате возникают локальные микронапряжения. Кроме того, нестабильности термоЭДС способствуют следующие факторы. Повышенная летучесть — ею может обладать один из компонентов сплавов, применяемых для изготовления ПТ, особенно при высоких температурах. Активное испарение металла электрода ограничивает срок службы ПТ. Диффузия одного или нескольких компонентов сплава через спай изменяет состав термоэлектродов вблизи рабочего спаия; погрешности возникают, как только зона диффузии достигнет поля градиента температур.

Окисление одного или обоих термоэлектродов определяет максимальную допустимую рабочую температуру многих ПТ. Защитная трубка, содержащая нейтральную или восстановительную среду, помогает затормозить процесс окисления. Состав термоэлектродов может измениться не только за счет окисления, но и в восстановительных средах. Это в особенности относится к электродам на основе вольфрама и металлов платиновой группы. Из восстановительной среды термоэлектроды насыщаются водородом или подвергаются карбидизации, что приводит к изменению химического состава и термоэлектрических характеристик. Electroды на платиновой основе удается вернуть к первоначальным характеристикам прокаливанием электрическим током в окислительной среде.

Деформации, в частности резкие перегибы, вносят в термоэлектрод внутренние напряжения, могут создать физическую неоднородность, которая через изменение химического потенциала влияет на термоЭДС. Чрезмерный рост зерен приводит к возникновению больших локальных пиковых напряжений, что влияет на термоЭДС. Ядерное облучение в металлах вызывает нарушения двух типов (внедрения и вакансий) и изменение структуры в результате резкого повышения

температуры. Среднее расстояние между внедрением и вакансией в местах повышения температуры не превышает двух-трех межатомных расстояний, вследствие чего в материале возможны большие локальные напряжения. При воздействии облучения на твердое тело дополнительным источником упругих напряжений являются радиационные дефекты, особенно междоузельные атомы, которые, по крайней мере, в виде скоплений устойчивы до высоких температур. При измерении температуры в ядерных реакторах (в общем случае нейтронной бомбардировки) нестабильность термоЭДС может оказаться результатом изменения состава сплава, вызванного атомными превращениями.

Токи утечки. При измерениях в электропечах самые незначительные утечки рабочего тока могут приводить к заметным возмущениям. Печи, как правило, питаются переменным током. Раскаленная керамика и окислы на поверхности проводников в некоторых случаях приобретают вентильные свойства. Это приводит к появлению в измерительных цепях падений электрических потенциалов, которые невозможно отличить от рабочих сигналов, обусловленных термоЭДС. Изложенное справедливо не только для печей, работающих на промышленной частоте, но и для индукционных печей, работающих на высокой частоте. Заземляя рабочий спай ПТ, или помещая между ПТ и муфелем заземленный металлический экран, или вводя в цепь ПТ фильтр переменного тока, можно исключить либо, по крайней мере, уменьшить токи утечки. При установке заземления необходимо соблюдать особую предосторожность; ПТ, заземленный более чем в одной точке, может дать погрешность в сотни кельвинов.

Удлинительные провода. Согласно ГОСТ 3044—77, стандартная номинальная статическая характеристика ПТ определяется при температуре свободных концов (опорного спая), равной 0 °С. Однако в практике измерений это требование или неудобно для исполнения, или трудно выполнимо. В большинстве случаев гораздо удобнее во время установления номинальных статических характеристик выдерживать свободные концы ПТ при 0 °С, а во время эксплуатации — при другой температуре, например при T_2 . Значит, необходимо вносить поправки на отличие температуры свободных концов от 0 °С. Для этого к измеренной термоЭДС ПТ добавляется термоЭДС, соответствующая температуре свободных концов. Важно точно знать температуру свободных концов ПТ T_2 в условиях эксплуатации и обеспечить ее стабильность в течение всего периода измерений. Однако выполнить последнее требование в производственных условиях затруднительно. Свободные концы обычно нагреваются в процессе работы до температур, достигающих 200 °С. Чтобы уменьшить влияние температуры свободных концов, применяют удлинительные провода.

Существует два способа подбора удлинительных проводов. Первый способ — подбирают провода, идентичные по термоэлектрическим свойствам термоэлектродом (т. е. в паре соответствующим термоэлектродом они имеют нулевую термоЭДС — поэлектродная компенсация). Этот способ наиболее универсальный, применяется при измерениях с повышенной точностью. Равенство температур мест соединения удлинительных проводов и свободных концов ПТ не обязательно. Второй способ — подбирается пара удлинительных проводов, у которой номинальная статическая характеристика в заданном интервале температур соответствует номинальной статической характеристике ПТ (суммарная компенсация). Равенство температур мест соединения удлинительных проводов и свободных концов ПТ обязательно.

Стандартные удлинительные провода маркируются. При включении этих проводов в цепь ПТ необходимо соблюдать полярность, иначе при измерениях возникает погрешность, равная удвоенной погрешности

Т а б л и ц а 8.4. Основные характеристики термопар и удлинительных

Термопара	Условное обозначение номинальной статической характеристики	Материал термоэлектрода	
		положительного	отрицательного
Платинородий — платина	ПП	Платинородий (90 % Pt + + 10 % Rh)	Платина
Платинородий — платинородий	ПР30/6	Платинородий (70 % Pt + + 30 % Rh)	Платинородий (94 % Pt + + 6 % Rh)
Хромель—алюмель	ХА	Хромель (89 % Ni + + 9,8 % Cr + + 1 % Fe + + 0,2 % Mn)	Алюмель (94 % Ni + + 2 % Al + + 2,5 % Mn + + 1 % Si + + 0,5 % Fe)
Хромель—копель	ХК	То же	Копель (55 % Cu + + 45 % Ni)
Железо—копель	ЖК	Железо	То же
Медь—копель	МК	Медь	» »
Медь—константан	МК	»	Константан (42 % Ni + + 58 % Cu)
Вольфрамарений	ВР5/20	Вольфрамарений (95 % W + + 5 % Re)	Вольфрамарений (80 % W + + 20 % Re)
»	ВР10/20	Вольфрамарений (90 % W + + 10 % Re)	То же
Вольфрам—молибден	ВМ	Вольфрам	Молибден
То же	ЦНИИЧМ-1	»	Молибден—алюминий (99,5 % Mo + + 0,5 % Al)

проводов

Материал удлинительного провода, марка и цвет оплетки		ТермоЭДС, мВ при $t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_0=0\text{ }^{\circ}\text{C}$	Сопротивление 1 м, Ом, для сечения, мм ²	
положительного	отрицательного		1	2,5
Медь П, красный или розовый	Медно-никелевый (99,4 % Cu + + 0,6 % Ni) зеленый	$0,64 \pm 0,03$	0,05	0,02
—	—	—	0,05	0,02
Медь М, красный или розовый	Константан (42 % Ni + 58 % Cu), коричневый	$4,10 \pm 0,16$	0,52	0,21
Хромель ХК, фиоле- товый или черный	Копель, желтый, оранжевый	$6,95 \pm 0,2$	1,15	0,46
Железо ЖК, белый	То же	5,57	0,60	0,24
Медь МК, красный или розовый	» »	4,76	0,50	0,20
То же	Константан, корич- невый или черный	$4,10 \pm 0,16$	0,52	0,21
То же	Медно-никелевый (97,6 % Cu + + 2,4 % Ni), синий или голубой	$1,33 \pm 0,03$ ($1,40 \pm 0,03$)	0,20	0,08
Медь МК, красный или розовый	Медно-никелевый (98,8 % Cu + + 1,2 % Ni)	$0,97 \pm 0,02$	0,10	0,04
То же	Медно-никелевый (99,7 % Cu + + 0,3 % Ni)	$0,40 \pm 0,03$	0,05	0,02
—	—	—	0,05	0,02

сти, которую старались устранить с помощью удлинительных проводов. Промышленность выпускает удлинительные провода в виде скомпектованного (двухжильного) провода с различными цветами оболочек каждой жилы. В табл. 8.4 приведены основные сведения об удлинительных проводах, а в табл. 8.5 — их область применения.

Т а б л и ц а 8.5. Основные области применения проводов

Марка	Краткая характеристика	Применение
КПВ	С полихлорвиниловой изоляцией в общей полихлорвиниловой оболочке	Для присоединения термопар. Прокладываются в сухих помещениях или газовых трубах при температуре не выше $+65^{\circ}\text{C}$
КВПВ	С полихлорвиниловой изоляцией в общей полихлорвиниловой оболочке в оплетке из стальных проволок	То же. Для установки на транспорте
КПГВ	Гибкий с полихлорвиниловой изоляцией в общей полихлорвиниловой оболочке	То же. Для переносных установок
ПКГВ	Гибкий с поливинилхлоридными изоляцией и оболочкой	То же. Для термопар ВР5/20, ВР10/20, ВМ; в диапазоне температур от -40 до 65°C
АКГВЭВ	Гибкий с поливинилхлоридной изоляцией в оболочке, экранированный с наружной поливинилхлоридной оболочкой	То же
ФК-Х	Теплостойкий одножильный с хромелевой жилой	Для подсоединения термопар: в диапазоне температур от -60 до 250°C и кратковременно (не более 3 ч) в один цикл нагрева до 350°C
ФК-А	То же, с алюмелевой жилой	То же
ПКЛ	Теплостойкий двухжильный с лавсановой изоляцией, обмотанный стекловолокном или волокном лавсана с пропиткой лаком в общей оплетке из волокна лавсана, подклеенной лаком	» »
ПКЛЭ	То же, экранированный	» »

8.2. Изготовление термопар

Показания термопары корректны, если выполняются следующие условия: в неизотермической области термоэлектроды должны быть однородными; там, где однородность невозможна, необходима изотермичность. При измерении температуры энергонапряженных объектов, в которых имеются большие градиенты и скорости изменения темпе-

ратуры, важную роль играет место соединения (спая) термопар. Спай должен удовлетворять следующим требованиям: 1) обладать высокой механической прочностью: место спая не должно быть менее прочным, чем материал термоэлектродов; 2) обладать высокой химической стойкостью: в агрессивных средах спай не должен корродировать заметно быстрее термоэлектродов; 3) обладать низким омическим сопротивлением; 4) зона неоднородности, образующаяся в спаях, должна быть минимальной; 5) перечисленные требования должны выполняться во всех диапазонах измеряемых температур.

Пайка оловянно-свинцовыми припоями рекомендуется для работы при температурах до 150 °С. Перед пайкой концы термоэлектродов тщательно лудятся. Полуда не должна выходить далеко за пределы спая. Переход от луженного участка к нелуженному должен быть четко ограничен. Полуда обычно наносится горячим способом (паяльником) или гальваническим осаждением из раствора.

Из стандартных термоэлектродов наиболее трудно лудить алюминий, который необходимо перед лужением тщательно зачистить и обработать методом травления в соляной кислоте. После лужения заготовленные концы очищают от остатков флюса, излишков припоя и промывают в теплой воде. Термоэлектроды укладывают так, чтобы окончания полуды были на одинаковом уровне, а полуженные участки плотно закручивают на два — четыре оборота. На скрутку накладывают кусочек припоя, а весь спай прогревают, пока припой не заполнит место контакта термоэлектродов.

Пайка жесткими медно-серебряно-цинковыми припоями рекомендуется для работы при температурах до 700 °С. Номенклатура и составы их регламентированы ГОСТ 8190—56. Зачищенные термоэлектроды скручивают так же, как и при пайке припоем. Место спая укладывают на огнеупорный материал, чтобы скрутка располагалась с небольшим уклоном в сторону конца спая. Сверху на спай накладывают кусочек припоя и засыпают флюсом. При отсутствии специальных флюсов обходятся бурой. После описанной подготовки место спая нагревают в электрической печи или при помощи газовой горелки.

При газовой сварке заготовленные и скрученные термоэлектроды оплавляют в пламени горелки с образованием каплевидного шарика — спая. Для большинства материалов желательно восстановительное пламя. Лишь платиновые и платинородиевые термоэлектроды легко переносят более благоприятную для них окислительную среду. Для изготовления термопар лучше всего применять водородно-кислородное пламя. Высокая температура пламени позволяет производить сварку с минимальными размерами зоны прогрева. Следует воздержаться от совмещения сварки с отжигом в горелке, что приводит к увеличению зоны неоднородности, а значит, и к порче термопары. Отжиг следует производить в специальных печах. Кроме того, водород менее склонен к образованию соединений с термоэлектродными материалами, чем углерод, обычно содержащийся во всех горючих газах. Особой чувствительностью к науглероживанию отличаются высокотемпературные термопары, в которых опасность карбидизации спая увеличивается вследствие того, что вызванная ею неоднородность при высоких температурах непрерывно распространяется по термоэлектроду (увеличивая градиент микронапряжений), все более изменяя свойства термопары.

Электросварка в дуге между двумя электродами почти не отличается от газовой сварки. Различие состоит лишь в том, что при электросварке в дуге между двумя электродами

создается более инертная среда. Обычно применяют графитовые электроды. Графитно-дуговой сварке присущи почти все недостатки газовой, в частности сильная карбидизация электродов. Для получения нейтральной среды электроды изготавливают из вольфрама, а в зону дуги вдувают инертный газ (чаще всего аргон) с небольшими примесями кислорода для поддержания устойчивости горения дуги. Если после образования спая дугу выключить и дать спая остынуть в инертной среде, то спай получается в виде чистого блестящего металлического шарика, не требующего ни очистки, ни последующей обработки. Насыщение места спая вольфрамом незначительно.

Электросварка на одном угольном или графитовом электроде более проста и может быть налажена в условиях любой лаборатории. Источником регулируемого напряже-

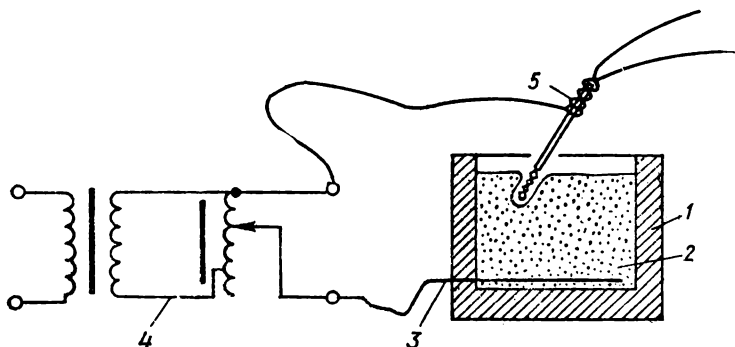


Рис. 8.4. Сварка термопар в графитовой ванне:

1 — тигель; 2 — графитовая засыпка; 3 — нижний электрод; 4 — автотрансформатор; 5 — зажим для свариваемой термопары.

ния является обычный лабораторный автотрансформатор типа ЛАТР-1 с максимальным рабочим током 9 А. Один конец выходной обмотки соединен с устройством, в котором зажата подготовленная к сварке скрутка термоэлектродов, другой — с угольным или графитовым электродом, закрепленным в специальном держателе. Термоэлектроды зажимаются таким образом, чтобы скрутка выступала из зажимного устройства на 20—40 диаметров проволоки. Конец скрутки обрезают ножницами или кусачками с тем, чтобы дуга загоралась на обоих термоэлектродов одновременно.

Сварка в ванне графитового или угольного порошка отличается от электросварки на угольном или графитовом электроде тем, что графитовый электрод заменяют ванночкой, сделанной из изоляционного материала и заполненной зернистым графитом или электродным углем (рис. 8.4). При частой сварке ванночка 1 должна выдерживать температуру до 200 °С. На дне коробки устанавливают медную шину 3, присоединенную к одному из выводов автотрансформатора. Ко второму выводу присоединяют гибкий провод с зажимом на конце. В зажиме укрепляют подготовленные к сварке термоэлектроды так, чтобы скрутка выступала вниз на 60—40 мм.

При опускании скрутки в графитовую ванну зерна, прилегающие к скрутке, и их окружение быстро нагреваются до белого каления. В некоторых местах загораются маленькие дуги. Раскаленный графит нагревает скрутку до оплавления с образованием шарика. При

использовании этого вида сварки целесообразно применять флюс, что при налаженной технологии позволяет получать чистые спай правильной формы. Флюс предохраняет спай от окисления при остывании, а также от насыщения углеродом при плавлении. Раскаленный графит образует восстановительную среду. Размер зерна 0,5...0,8 диаметра свариваемой проволоки, глубина засыпки в ванне 30...60 мм. Напряжение питания регулируется в зависимости от условий сварки, среднее значение напряжения около 50 В.

Сварка в жидких ваннах с электролитом. При сварке в электролите вместо графитового порошка в ванну заливают электролит. В качестве электролита чаще всего используют спирты (обычно этиловый). Хорошие спай получают при сварке в растворе аммиака, но из-за летучести последнего его с успехом заменяют раствором нашатыря (хлористый аммоний). Очевидно, любой хорошо проводящий электролит даст удовлетворительные результаты.

Последние два способа сварки (в графитовой и электролитической ваннах) удобны тем, что можно сваривать уже изолированные термоэлектроды. От изоляции зачищают только небольшие участки под скрутку. Присоединение к трансформатору производят от противоположных концов электродов. При этом изоляция нарушается лишь на расстоянии 3—5 мм от шарика спая.

Конденсаторная сварка. Для сварки термпар применяют близкие по рабочим параметрам сварочные машины ТКМ-4, ТКМ-7 и ТКМ-8. На рис. 8.5 приведена схема машины ТКМ-7. При подаче напряжения на входные зажимы машины первичная обмотка стабилизирующего выпрямительного трансформатора СТВ получает питание через выключатель. Сразу после включения через селеновый двухполупериодный выпрямитель начинается зарядка батарей конденсаторов. Зарядка максимальной емкости длится не более 0,5 с. Емкость конденсаторной батареи определяется числом и положением гнезд штеккеров, включаемых в верхнем (на схеме) ряду переключателя.

При нажиме на педаль машины электроды сближаются и сжимают свариваемое изделие, затем происходит переключение подвижной планки переключателя из правого положения в левое. При этом размыкается цепь зарядки конденсаторов и немедленно начинается их разряд на первичную обмотку сварочного трансформатора, коэффициент трансформации которого регулируется перестановкой штеккера в нижнем ряду гнезд переключателя. Индуктирование во вторичном витке

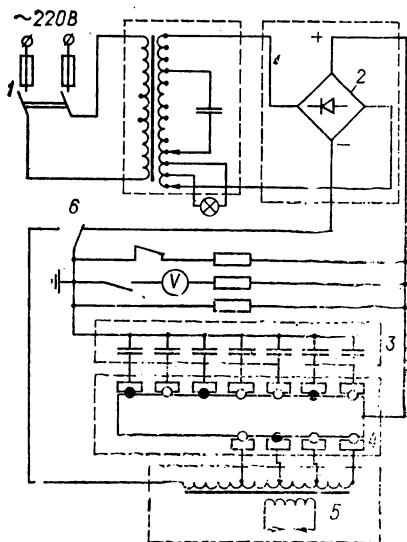


Рис. 8.5. Схема сварочной конденсаторной машины:

1 — выключатель; 2 — выпрямитель; 3 — батарея конденсаторов; 4 — переключатель; 5 — сварочный трансформатор; 6 — контактор.

трансформатора импульса тока обуславливает сварку деталей, зажатых между электродами машины.

С помощью машины можно сваривать проволоки диаметром от 0,05 до 1,00 мм и приваривать их к металлическим поверхностям. Поскольку время сварки измеряется миллисекундами, зона прогрева незначительно превышает диаметр проводника.

Сварка в оптическом изображении Солнца или плазменной дуги может производиться в полностью инертной среде без загрязнения примесями. Оптическая система с большой светосилой позволяет получать в изображении приведенную температуру, превышающую половину температуры источника излучения (оригинала). Из серийных плазменно-дуговых оптических устройств можно рекомендовать установки типа «Уран». Высокая чистота среды позволяет получать в таких устройствах самые чистые спаи.

Защитные оболочки и изоляции. Для правильного составления электрической цепи термоэлектроды должны быть изолированы друг от друга и от внешних электрических влияний. При низких температурах (не превышающих 100...120 °С) применяют хлопчатобумажную и шелковую оплетку, кембриковые трубочки (чулочки), трубочки из различных пластмасс (хлорвинил, капрон и др.). Покрытие проводов лаковыми эмалями сохраняет их хорошие изоляционные свойства до 200 °С. При более высоких температурах применяют оплетку из стекловолокон и лаки на кремнийорганической и фтористой основе. Эти изоляции переносят температуру до 500 °С, сохраняя эластичность, высокую механическую и электрическую прочность. Лаки и клеи повышенной термостойкости (до 500 °С) требуют обязательной в каждом случае индивидуальной термообработки.

В настоящее время применяют обмотку термоэлектродов асбестом. Для получения тонкой асбестовой изоляции используют длиноволокнистый материал, идущий обычно на тканые асбестовые изделия. Длительное пребывание асбеста при температуре выше 600 °С разрушает волокна и превращает их в порошок. Для температур выше 600 °С практически не существует эластичной изоляции. Тонкие нити из высокоогнеупорных материалов (кварц, корунд, окись магния) дороги и дефицитны. Все эластичные виды изоляции в большей или меньшей мере газопроницаемы. Технология плазменного напыления позволяет получить тонкий слой тугоплавкого окисла. При последующем покрытии жаростойким металлом изоляция на проводе получается достаточно эластичной, а провод можно многократно изгибать.

При измерении высоких температур приходится применять жесткие хрупкие элементы. Конструктивно они выполняются в виде трубок с одним, двумя и более каналами (соломки) и бус различных размеров из жароупорных материалов. При высоких температурах агрессивность среды значительно возрастает и для многих термоэлектродов становятся опасными такие элементы, как водород, сера, углерод и др. Возникает необходимость не только изолировать термоэлектроды друг от друга, но и герметизировать их.

8.3. Термопары для измерения низких температур

Характерной особенностью термоэлектрического метода измерения низких температур является то, что с убыванием температуры ухудшаются условия генерирования термоЭДС. При переходе в состояние сверхпроводимости термоэлектрический эффект Зеебека, на котором основано действие ПТ, очевидно, полностью исчезает.

Термопара медь — константан (ТМК) в практике измерения низких температур получила наиболее широкое применение. Номинальная статическая характеристика ТМК для диапазона температур 2...273 К приведена в табл. 8.6. В отличие от электродов из чистых металлов сплавы часто выходят за рамки требований по неоднородности, предъявляемых к термоэлектродам. Особенно это относится к константану, выбор которого для измерения низких температур требует особой тщательности и внимания. Для ПТ пригоден только термопарный константан. Обычная электротехническая медь удовлетворяет требованиям по неоднородности. Как видно из табл. 8.6, термоЭДС ТМК убывает с температурой и при 20 К становится меньше

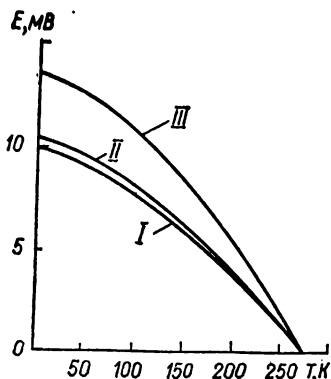


Рис. 8.6. Зависимость от температуры интегральной термоЭДС $\text{Au} + 21 \text{ ат. \% Со}$ в паре с:

I — серебром; II — медью; III — хромелем.

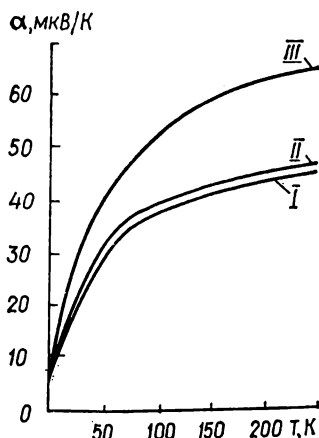


Рис. 8.7. Зависимость от температуры дифференциальной термоЭДС $\text{Au} + 21 \text{ ат. \% Со}$ в паре с:

I — серебром; II — медью; III — хромелем.

5 мкВ/К. При температурах ниже тройной точки водорода (13,81 К) используются сплавы Кондо, значительно более эффективные, чем ТМК в диапазоне температур 2...20 К.

Термопары из сплавов Кондо в паре с обычными термоэлектродами эффективны при измерениях температур ниже водородных. Сплавы Кондо представляют собой твердые растворы, в которых в обыкновенном металле в очень небольших концентрациях растворены переходные или редкоземельные металлы. Концентрация растворов составляет от нескольких тысячных до нескольких десятых долей атомного процента. Для них характерна очень большая по сравнению со всеми остальными металлами и сплавами термоЭДС (в некоторых источниках ее называют «гигантской»). Наиболее исследованы растворы железа, кобальта, марганца, серебра, меди. На рис. 8.6 и 8.7 представлены температурные зависимости полной и дифференциальной термоЭДС для термопар, которые составлены из термоэлектродов, изготовленных из сплава золота с 2,1 ат. % кобальта, и других распространенных термоэлектродов.

Для измерения «гелиевых» и «водородных» температур наиболее применим ПТ, в котором один из термоэлектродов изготовлен из сплава

Т а б л и ц а 8.6. Номинальная статическая характеристика термопары медь—константан

<i>T</i> , К	<i>E</i> , мкВ	α , мкВ/К	<i>T</i> , К	<i>E</i> , мкВ	α , мкВ/К
2	6030,85	—0,615	52	5701,18	—12,001
3	6030,09	—0,901	53	5689,09	—12,170
4	6029,06	—1,170	54	5676,84	—12,336
5	6027,76	—1,425	55	5664,42	—12,499
6	6026,21	—1,670	56	5651,84	—12,660
7	6024,42	—1,909	57	5639,10	—12,819
8	6022,39	—2,142	58	5626,20	—12,975
9	6020,14	—2,372	59	5613,15	—13,129
10	6017,65	—2,601	60	5599,95	—13,281
11	6014,94	—2,829	61	5586,59	—13,431
12	6011,09	—3,059	62	5573,08	—13,580
13	6008,82	—3,289	63	5559,43	—13,727
14	6005,41	—3,521	64	5545,63	—13,872
15	6001,77	—3,756	65	5531,69	—14,016
16	5997,90	—3,993	66	5517,60	—14,158
17	5993,79	—4,232	67	5503,37	—14,300
18	5989,44	—4,473	68	5489,00	—14,440
19	5984,84	—4,716	69	5474,49	—14,579
20	5980,00	—4,961	70	5459,84	—14,717
21	5974,92	—5,207	71	5445,06	—14,855
22	5969,59	—5,455	72	5430,14	—14,991
23	5964,01	—5,703	73	5415,08	—15,127
24	5958,18	—5,952	74	5399,88	—15,262
25	5952,10	—6,201	75	5384,55	—15,397
26	5945,78	—6,450	76	5369,09	—15,531
27	5939,21	—6,698	77	5353,49	—15,664
28	5932,38	—6,944	78	5337,76	—15,797
29	5925,32	—7,190	79	5321,90	—15,930
30	5918,01	—7,433	80	5305,90	—16,062
31	5910,45	—7,675	81	5289,77	—16,194
32	5902,66	—7,914	82	5273,52	—16,325
33	5894,63	—8,150	83	5257,12	—16,456
34	5886,36	—8,384	84	5240,60	—16,587
35	5877,86	—8,615	85	5223,95	—16,717
36	5869,13	—8,842	86	5207,17	—16,848
37	5860,17	—9,066	87	5190,26	—16,978
38	5851,00	—9,287	88	5173,21	—17,107
39	5841,60	—9,504	89	5156,04	—17,237
40	5831,99	—9,718	90	5138,74	—17,366
41	5822,17	—9,928	91	5121,31	—17,495
42	5812,14	—10,134	92	5103,75	—17,624
43	5801,90	—10,336	93	5086,06	—17,752
44	5791,46	—10,535	94	5068,24	—17,881
45	5780,83	—10,731	95	5050,30	—18,009
46	5770,00	—10,922	96	5032,23	—18,136
47	5758,99	—11,110	97	5014,03	—18,264
48	5747,78	—11,295	98	4995,70	—18,391
49	5736,40	—11,476	99	4977,25	—18,518
50	5724,83	—11,654	100	4958,66	—18,645
51	5713,03	—11,829	101	4939,96	—18,772

T, K	$E, \text{мкВ}$	$\alpha, \text{мкВ/К}$	T, K	$E, \text{мкВ}$	$\alpha, \text{мкВ/К}$
102	4921,12	-18,898	152	3822,43	-24,987
103	4902,16	-19,024	153	3797,38	-25,105
104	4883,07	-19,150	154	3772,22	-25,222
105	4863,86	-19,275	155	3746,94	-25,340
106	4844,52	-19,401	156	3721,54	-25,456
107	4825,06	-19,526	157	3696,02	-25,573
108	4805,47	-19,651	158	3670,39	-25,690
109	4785,76	-19,776	159	3644,64	-25,806
110	4765,92	-19,900	160	3618,78	-25,922
111	4745,96	-20,024	161	3592,80	-26,038
112	4725,87	-20,148	162	3566,70	-26,154
113	4705,66	-20,272	163	3540,40	-26,269
114	4685,33	-20,396	164	3514,17	-26,384
115	4664,87	-20,519	165	3487,72	-26,499
116	4644,29	-20,643	166	3461,17	-26,613
117	4623,58	-20,766	167	3434,50	-26,727
118	4602,76	-20,889	168	3407,71	-26,841
119	4581,81	-21,011	169	3380,82	-26,955
120	4560,73	-21,134	170	3353,81	-27,068
121	4539,54	-21,256	171	3326,68	-27,181
122	4518,22	-21,379	172	3299,44	-27,294
123	4496,78	-21,501	173	3272,09	-27,406
124	4475,22	-21,623	174	3244,63	-27,519
125	4453,53	-21,745	175	3217,06	-27,631
126	4431,73	-21,866	176	3189,37	-27,746
127	4409,80	-21,988	177	3161,57	-27,854
128	4387,75	-22,110	178	3133,66	-27,966
129	4365,58	-22,231	179	3105,64	-28,077
130	4343,29	-22,352	180	3077,51	-28,188
131	4320,88	-22,473	181	4049,26	-28,299
132	4298,34	-22,594	182	3020,91	-28,409
133	4275,69	-22,715	183	2992,45	-28,520
134	4252,91	-22,836	184	2963,87	-28,630
135	4230,02	-22,957	185	2935,19	-28,740
136	4207,00	-23,078	186	2906,39	-28,850
137	4183,86	-23,198	187	2877,49	-28,960
138	4160,60	-23,318	188	2848,47	-29,069
139	4137,23	-23,439	189	2819,35	-29,179
140	4113,73	-23,559	190	2790,11	-29,288
141	4090,11	-23,679	191	2760,77	-29,397
142	4066,37	-23,798	192	2731,32	-29,507
143	4042,51	-23,918	193	2701,76	-29,616
144	4018,53	-24,037	194	2672,09	-29,724
145	3994,44	-24,157	195	2642,31	-29,833
146	3970,22	-24,276	196	2612,42	-29,942
147	3945,88	-24,395	197	2582,43	-30,050
148	3921,43	-24,514	198	2552,32	-30,158
149	3896,86	-24,632	199	2522,11	-30,266
150	3872,17	-24,751	200	2491,79	-30,376
151	3847,36	-24,869	201	2461,36	-30,482

Продолжение табл. 8.6

T, K	$E, мкВ$	$\alpha, мкВ/К$	T, K	$E, мкВ$	$\alpha, мкВ/К$
202	2430,82	-30,590	238	1262,14	-34,262
203	2400,18	-30,697	239	1227,83	-34,360
204	2369,43	-30,805	240	1193,42	-34,456
205	2338,57	-30,912	241	1158,92	-34,553
206	2307,61	-31,019	242	1124,31	-34,649
207	2276,53	-31,125	243	1089,62	-34,746
208	2245,36	-31,232	244	1054,82	-34,842
209	2214,07	-31,338	245	1019,93	-34,939
210	2182,68	-31,444	246	984,94	-35,036
211	2151,18	-31,549	247	949,86	-35,133
212	2119,58	-31,654	248	914,68	-35,230
213	2087,88	-31,759	249	879,40	-35,327
214	2056,06	-31,864	250	844,02	-35,424
215	2024,15	-31,968	251	808,55	-35,521
216	1992,13	-32,072	252	772,98	-35,618
217	1927,78	-32,175	253	737,32	-35,715
218	1927,78	-32,279	254	701,55	-35,811
219	1895,45	-32,381	255	665,70	-35,907
220	1863,01	-32,484	256	626,74	-36,002
221	1830,48	-32,586	257	593,69	-36,096
222	1797,84	-32,687	258	557,55	-36,190
223	1765,11	-32,788	259	521,31	-36,282
224	1732,27	-32,889	260	484,99	-36,372
225	1699,33	-32,989	261	448,57	-36,460
226	1666,29	-33,089	262	412,07	-36,546
227	1633,15	-33,189	263	375,48	-36,629
228	1599,91	-33,288	264	338,81	-36,709
229	1556,57	-33,386	265	302,06	-36,785
230	1533,14	-33,485	266	265,24	-36,856
231	1499,61	-33,583	267	228,35	-36,922
232	1465,97	-33,681	268	191,40	-36,982
233	1432,24	-33,778	269	154,39	-37,035
234	1398,42	-33,876	270	117,33	-37,081
235	1364,49	-33,973	271	80,23	-37,118
236	1330,47	-34,070	272	43,10	-37,146
237	1296,35	-34,166	273	5,94	-37,163

золота с 0,07 ат. % железа. На рис. 8.8 представлена температурная зависимость интегральной термоЭДС такого термоэлектрода в паре с медью и хромелем, на рис. 8.9 — температурная зависимость чувствительности этой термопары. Невоспроизводимость значений $E(T)$, связанная с повторением циклов охлаждения, не превышает $\pm 0,01$ % при измерении «гелиевых» температур и уменьшается с повышением температуры. Разброс значений термоЭДС для 15 произвольно выбранных термоэлектродов одной и той же катушки имеет наибольшее значение при 4,2 К и соответствует $\pm 0,2$ %. Нестандартизированная номинальная статическая характеристика сплава золота с 0,07 ат. % железа в паре с хромелем приведена в табл. 8.7, а в паре с медью — в табл. 8.8.

Для измерений в диапазоне температур 1—80 К рекомендуются ПТ, у которых электроды изготовлены из сплава серебра с 0,37 ат. %

Таблица 8.7. E и dE/dT для термопары $Au + 0,07 \text{ ат. \% Fe}$ относительно хромеля (свободный спай при температуре 0°C)

T, K	$E, \text{мкВ}$	$dE/dT, \text{мкВ/К}$	T, K	$E, \text{мкВ}$	$dE/dT, \text{мкВ/К}$
2	5262,72	—11,05	50	4491,09	—16,428
3	5251,15	—12,079	51	4474,64	—16,464
4	5238,61	—12,969	52	4458,16	—16,501
5	5225,25	—13,733	53	4441,64	—16,540
6	5211,18	—14,384	54	4425,08	—16,581
7	5196,52	—14,932	55	4408,47	—16,624
8	5181,35	—15,395	56	4391,83	—16,668
9	5165,76	—15,772	57	4375,14	—16,714
10	5149,83	—16,081	58	4358,40	—16,761
11	5133,62	—16,327	59	4341,62	—16,809
12	5117,19	—16,520	60	4324,78	—16,858
13	5100,59	—16,665	61	4307,90	—16,907
14	5083,87	—16,771	62	4290,97	—16,957
15	5067,06	—16,842	63	4273,99	—17,006
16	5050,20	—16,884	64	4256,96	—17,055
17	5033,30	—16,903	65	4239,88	—17,084
18	5016,40	—16,901	66	4222,77	—17,135
19	4999,51	—16,884	67	4205,61	—17,186
20	4982,64	—16,854	68	3649,81	—17,574
21	4965,80	—16,814	69	4171,14	—17,288
22	4949,01	—16,768	70	4153,82	—17,340
23	4932,27	—16,718	71	4136,46	—17,393
24	4915,57	—16,665	72	4119,04	—17,442
25	4898,94	—16,610	73	4101,57	—17,493
26	4882,35	—16,557	74	4083,95	—17,553
27	4865,82	—16,505	75	4066,37	—17,603
28	4849,34	—16,456	76	4048,74	—17,652
29	4832,91	—16,410	77	4031,06	—17,700
30	4816,52	—16,369	78	4013,34	—17,748
31	4800,17	—16,331	79	3995,57	—17,794
32	4783,86	—16,298	80	3977,75	—17,840
33	4767,57	—16,270	81	3959,89	—17,885
34	4751,32	—16,246	82	3944,98	—17,929
35	4735,08	—16,229	83	3927,93	—17,973
36	4718,86	—16,216	84	3906,04	—18,016
37	4702,65	—16,207	85	3888,00	—18,059
38	4686,44	—16,203	86	3869,92	—18,101
39	4670,24	—16,203	87	3851,79	—18,143
40	4654,03	—16,208	88	3833,63	—18,184
41	4637,82	—16,216	89	3815,43	—18,225
42	4621,60	—16,228	90	3797,18	—18,265
43	4605,36	—16,243	91	3778,90	—18,305
44	4589,11	—16,262	92	3760,57	—18,344
45	4572,84	—16,283	93	3742,21	—18,383
46	4556,54	—16,307	94	3723,81	—18,422
47	4540,22	—16,334	95	3705,37	—18,460
48	4523,88	—16,363	96	3686,89	—18,498
49	4507,50	—16,395	97	3668,37	—18,536

Продолжение табл. 8.7

T, K	$E, \text{мкВ}$	$dE/dT, \text{мкВ/K}$	T, K	$E, \text{мВ}$	$dE/dT, \text{мкВ/K}$
98	3649,81	-18,574	145	2738,98	-20,118
99	3631,22	-18,611	146	2718,85	-20,146
100	3612,59	-18,648	147	2698,69	-20,174
101	3593,93	-18,685	148	2678,50	-20,202
102	3575,22	-18,721	149	2658,29	-20,229
103	3556,48	-18,758	150	2638,04	-20,257
104	3537,71	-18,794	151	2617,77	-20,284
105	3518,90	-18,830	152	2597,48	-20,311
106	3505,28	-18,865	153	2577,15	-20,337
107	3481,17	-18,901	154	2556,80	-20,363
108	3462,25	-18,936	155	2536,43	-20,390
109	3443,29	-18,971	156	2516,02	-20,415
110	3424,30	-19,006	157	2495,59	-20,441
111	3405,28	-19,041	158	2475,14	-20,466
112	3386,22	-19,075	159	2454,66	-20,492
113	3367,13	-19,110	160	2434,16	-20,518
114	3348,00	-19,144	161	2413,63	-20,541
115	3328,84	-19,178	162	2393,08	-20,565
116	3309,65	-19,212	163	2372,50	-20,590
117	3290,42	-19,246	164	2351,90	-20,614
118	3271,16	-19,276	165	2331,27	-20,647
119	3251,86	-19,313	166	2310,62	-20,661
120	3232,53	-19,346	167	2287,95	-20,684
121	3213,17	-19,379	168	2269,25	-20,707
122	3193,77	-19,412	169	2248,54	-20,730
123	3174,35	-19,445	170	2227,79	-20,752
124	3154,39	-19,477	171	2207,03	-20,775
125	3135,39	-19,510	172	2186,24	-20,797
126	3115,87	-19,542	173	2165,44	-20,819
127	3096,31	-19,574	174	2144,61	-20,840
128	3076,72	-19,606	175	2123,76	-20,862
129	3057,10	-19,637	176	2102,88	-20,883
130	3037,44	-19,669	177	2081,99	-20,904
131	3017,76	-19,700	178	2061,07	-20,825
132	2998,04	-19,731	179	2040,14	-20,946
133	2978,30	-19,762	180	2019,18	-20,966
134	2958,52	-19,793	181	1998,21	-20,987
135	2938,71	-19,824	182	1977,21	-21,007
136	2918,87	-19,854	183	1956,19	-21,027
137	2899,00	-19,884	184	1935,16	-21,047
138	2879,10	-19,914	185	1914,10	-21,066
139	2859,17	-19,944	186	1893,02	-21,086
140	2839,21	-19,974	187	1871,93	-21,105
141	2819,23	-20,003	188	1850,81	-21,124
142	2799,21	-20,032	189	1829,68	-21,143
143	2779,16	-20,061	190	1808,53	-21,163
144	2759,09	-20,090	191	1787,36	-21,181

T, K	$E, \text{ мкВ}$	$dE/dT, \text{ мкВ/K}$	T, K	$E, \text{ мкВ}$	$dE/dT, \text{ мкВ/K}$
192	1766,17	-21,199	237	794,97	-21,926
193	1744,96	-21,218	238	773,04	-21,938
194	1723,73	-21,236	239	751,10	-21,950
195	1702,49	-21,254	240	729,14	-21,961
196	1681,22	-21,272	241	707,17	-21,972
197	1659,94	-21,290	242	685,20	-21,982
198	1638,64	-21,308	243	663,21	-21,992
199	1617,22	-21,326	244	641,21	-22,001
200	1595,99	-21,344	245	619,21	-22,010
201	1574,64	-21,361	246	597,19	-22,018
202	1553,27	-21,379	247	575,17	-22,025
203	1531,88	-21,396	248	553,14	-22,032
204	1510,48	-21,413	249	531,11	-22,038
205	1489,06	-21,431	250	509,07	-22,043
206	1469,62	-21,448	251	487,02	-22,047
207	1446,16	-21,465	252	464,98	-22,050
208	1424,69	-21,482	253	442,92	-22,052
209	1403,20	-21,499	254	420,87	-22,053
210	1381,69	-21,516	255	398,82	-22,053
211	1360,16	-21,533	256	376,77	-22,052
212	1338,62	-21,549	257	354,71	-22,050
213	1317,07	-21,566	258	332,67	-22,046
214	1295,49	-21,582	259	310,62	-22,041
215	1273,90	-21,599	260	288,58	-22,035
216	1252,30	-21,615	261	266,55	-22,027
217	1230,67	-21,631	262	244,53	-22,018
218	1209,03	-21,647	263	222,52	-22,007
219	1187,38	-21,664	264	200,52	-21,994
220	1165,71	-21,680	265	178,53	-21,979
221	1144,02	-21,695	266	156,56	-21,963
222	1122,32	-21,711	267	134,60	-21,944
223	1100,60	-21,727	268	112,67	-21,924
224	1078,86	-21,742	269	90,76	-21,901
225	1057,11	-21,758	270	68,87	-21,876
226	1035,35	-21,773	271	47,01	-21,848
227	1013,57	-21,788	272	25,17	-21,818
228	991,77	-21,803	273	3,37	-21,786
229	969,96	-21,818			
230	948,13	-21,832			
231	926,30	-21,832			
232	904,44	-21,860			
233	882,57	-21,874			
234	860,69	-21,888			
235	838,80	-21,901			
236	816,89	-21,914			

Т а б л и ц а 8.8. E и dE/dT для термопары $Au + 0,07$ ат. % Fe относительно меди (свободный спай при температуре $0^\circ C$)

T, K	$E, мВ$	$dE/dT, мВ/К$	T, K	$E, мВ$	$dE/dT, мВ/К$
2	1739,13	-10,540	47	1153,97	-10,683
3	1728,13	-11,429	48	1143,34	-10,588
4	1716,31	-12,188	49	1132,80	-10,495
5	1703,80	-12,828	50	1122,35	-10,401
6	1690,69	-13,361	51	1111,99	-10,309
7	1677,11	-13,798	52	1101,73	-10,216
8	1663,13	-14,148	53	1091,56	-10,123
9	1648,84	-14,421	54	1081,49	-10,030
10	1634,31	-14,625	55	1071,50	-9,936
11	1619,61	-14,769	56	1061,61	-9,843
12	1604,79	-14,859	57	1051,82	-9,749
13	1589,90	-14,903	58	1042,12	-9,655
14	1574,99	-14,906	59	1032,51	-9,561
15	1560,10	-14,874	60	1022,99	-9,466
16	1545,26	-14,812	61	1013,58	-9,373
17	1530,49	-14,725	62	1004,25	-9,279
18	1515,81	-14,617	63	995,02	-9,186
19	1501,26	-14,492	64	985,88	-9,094
20	1486,83	-14,353	65	976,83	-9,003
21	1472,55	-14,204	66	968,09	-8,924
22	1458,43	-14,046	67	959,20	-8,845
23	1444,46	-13,883	68	950,40	-8,767
24	1430,66	-13,716	69	941,67	-8,690
25	1417,03	-13,548	70	933,01	-8,615
26	1403,57	-13,379	71	924,44	-8,541
27	1390,27	-13,212	72	915,93	-8,468
28	1377,14	-13,046	73	907,50	-8,397
29	1361,18	-12,884	74	899,14	-8,326
30	1351,37	-12,725	75	890,85	-8,257
31	1338,73	-12,571	76	882,62	-8,189
32	1326,23	-12,421	77	874,47	-8,122
33	1313,88	-12,276	78	866,38	-8,056
34	1301,68	-12,135	79	858,36	-7,991
35	1289,61	-12,000	80	850,40	-7,927
36	1277,68	-11,870	81	842,50	-7,864
37	1265,87	-11,744	82	834,67	-7,802
38	1254,19	-11,623	83	826,90	-7,741
39	1242,62	-11,506	84	819,19	-7,680
40	1231,17	-11,393	85	811,54	-7,621
41	1219,84	-11,284	86	803,95	-7,562
42	1208,60	-11,178	87	796,41	-7,504
43	1197,48	-11,075	88	788,94	-7,447
44	1186,45	-10,974	89	781,52	-7,390
45	1175,53	-10,875	90	774,16	-7,334
46	1164,70	-10,778	91	766,85	-7,279

T, K	$E, \text{мкВ}$	$dE/dT, \text{мкВ/К}$	T, K	$E, \text{мкВ}$	$dE/dT, \text{мкВ/К}$
92	759,60	-7,225	138	476,66	-5,215
93	752,40	-7,171	139	471,46	-5,179
94	745,46	-7,117	140	446,30	-5,144
95	738,17	-7,065	141	461,17	-5,109
96	731,13	-7,013	142	456,08	-5,075
97	724,14	-6,961	143	451,02	-5,041
98	717,21	-6,910	144	446,00	-5,007
99	710,32	-6,860	145	441,01	-4,976
100	703,49	-6,810	146	436,05	-4,939
101	696,70	-6,761	147	431,13	-4,906
102	689,96	-6,712	148	426,24	-4,874
103	683,28	-6,664	149	421,38	-4,841
104	676,64	-6,616	150	416,56	-4,809
105	670,04	-6,568	151	411,77	-4,809
106	663,50	-6,521	152	407,01	-4,745
107	657,00	-6,475	153	402,28	-4,714
108	650,55	-6,429	154	397,58	-4,683
109	644,14	-6,383	155	392,91	-4,652
110	637,78	-6,338	156	388,27	-4,621
111	631,47	-6,293	157	383,67	-4,591
112	625,20	-6,248	158	379,03	-4,561
113	618,97	-6,204	159	374,55	-4,531
114	612,79	-6,161	160	370,03	-4,502
115	606,65	-6,117	161	365,54	-4,473
116	600,55	-6,074	162	361,08	-4,444
117	594,50	-6,032	163	356,66	-4,415
118	588,49	-5,990	164	352,25	-4,387
119	582,52	-5,948	165	347,88	-4,359
120	576,60	-5,806	166	343,54	-4,331
121	570,71	-5,865	167	339,22	-4,303
122	564,87	-5,824	168	334,93	-4,276
123	559,06	-5,784	169	330,67	-4,249
124	553,30	-5,744	170	326,43	-4,222
125	547,57	-5,704	171	322,22	-4,195
126	541,89	-5,664	172	318,04	-4,169
127	536,25	-5,626	173	313,89	-4,143
128	530,64	-5,586	174	309,76	-4,117
129	525,07	-5,548	175	305,65	-4,091
130	519,54	-5,509	176	301,57	-4,066
131	514,05	-5,472	177	297,52	-4,041
132	508,60	-5,434	178	293,49	-4,016
133	503,19	-5,397	179	289,49	-3,991
134	497,87	-5,360	180	285,51	-3,967
135	492,46	-5,323	181	281,55	-3,943
136	487,11	-5,287	182	277,62	-3,919
137	481,89	-5,251	183	273,72	-3,895

T, K	$E, \text{мкВ}$	$dE/dT, \text{мкВ/К}$	T, K	$E, \text{мкВ}$	$dE/dT, \text{мкВ/К}$
184	269,83	-3,871	230	113,95	-2,951
185	265,97	-3,848	231	111,01	-2,934
186	262,14	-3,825	232	108,09	-2,917
187	258,32	-3,802	233	105,18	-2,900
188	254,53	-3,779	234	102,29	-2,883
189	250,77	-3,756	235	99,41	-2,866
190	227,02	-3,734	236	96,55	-2,850
191	243,30	-3,712	237	93,71	-2,833
192	239,60	-3,690	238	90,89	-2,817
193	235,92	-3,668	239	88,08	-2,801
194	232,26	-3,646	240	85,29	-2,785
195	228,63	-3,624	241	82,51	-2,769
196	225,01	-3,603	242	79,75	-2,753
197	221,42	-3,582	243	77,00	-2,738
198	217,85	-3,561	244	74,27	-2,722
199	214,30	-3,540	245	71,56	-2,707
200	210,77	-3,519	246	68,86	-2,692
201	207,26	-3,459	247	66,17	-2,678
202	203,77	-3,478	248	63,50	-2,664
203	200,31	-3,458	249	60,85	-2,650
204	196,86	-3,437	250	58,20	-2,636
205	193,43	-3,417	251	55,57	-2,623
206	190,02	-3,397	252	52,96	-2,609
207	186,64	-3,378	253	50,36	-2,597
208	183,27	-3,358	254	47,77	-2,584
209	179,92	-3,338	255	45,19	-2,572
210	176,59	-3,319	256	42,62	-2,561
211	173,28	-3,300	257	40,07	-2,550
212	169,99	-3,280	258	37,52	-2,539
213	166,72	-3,261	259	34,99	-2,529
214	163,47	-3,242	260	32,46	-2,519
215	160,24	-3,223	261	29,95	-2,510
216	157,02	-3,204	262	27,44	-2,501
217	153,83	-3,186	263	24,95	-2,493
218	150,65	-3,167	264	22,46	-2,486
219	147,49	-3,149	265	19,97	-2,479
220	144,35	-3,130	266	17,50	-2,473
221	141,23	-3,112	267	15,03	-2,468
222	138,13	-3,094	268	12,56	-2,463
223	135,05	-3,075	269	10,10	-2,459
224	131,98	-3,057	270	7,65	-2,456
225	128,93	-3,040	271	5,19	-2,454
226	125,90	-3,022	272	2,74	-2,453
227	122,89	-3,004	273	0,28	-2,453
228	119,89	-2,986			
229	116,91	-2,969			

золота и золота с 0,03 ат. % железа. С понижением температуры чувствительность повышается и при 2 К составляет 10 мкВ/К, при 10 К — 14 мкВ/К, а при 40 К — 8 мкВ/К. При индивидуальном установлении номинальной статической характеристики ее погрешность достигает 0,1 К.

Для измерения низких температур разрабатываются термоэлектроды на основе сплавов из благородных металлов. Перспективным является термоэлектрод из сплава меди с железом. ПТ, имеющие такие термоэлектроды, по метрологическим характеристикам уступают ПТ, у которых термоэлектроды изготовлены из сплава золота с железом, но более доступны.

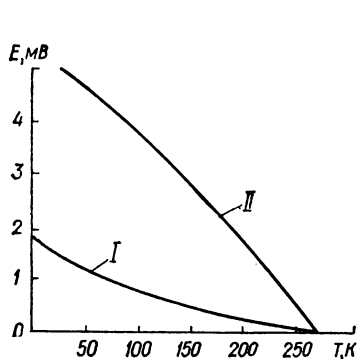


Рис. 8.8. Зависимость от температуры интегральной термоЭДС Au + 0,07 ат. % Fe в паре с:

I — медью; II — хромелем.

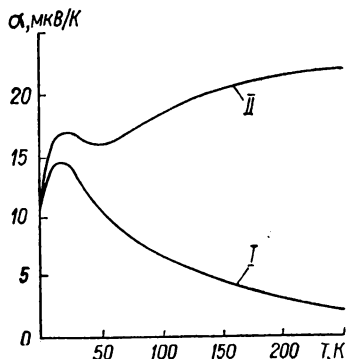


Рис. 8.9. Зависимость от температуры дифференциальной термоЭДС Au + 0,007 ат. % Fe в паре с:

I — медью; II — хромелем.

8.4. Термопары для измерения средних температур

Термопара хромель — алюмель (ТХА) обладает наиболее близкой к прямой термоэлектрической характеристикой. Термоэлектроды изготовлены из сплавов на никелевой основе. Хромель (НХ9,5) содержит 9...10 % Cr; 0,6...1,2 % Co; алюмель (НМцАК) — 1,6...2,4 % Al, 0,85...1,5 Si, 1,8...2,7 % Mn, 0,6...1,2 % Co. Алюмель светлее и слабо притягивается магнитом; этим он отличается от более темного в отожженном состоянии совершенно немагнитного хромеля. Номинальная статическая характеристика ТХА приведена в табл. 8.9, а допускаемые отклонения в показаниях — в табл. 8.10.

Благодаря высокому содержанию никеля хромель и алюмель лучше других благородных металлов по стойкости к окислению. Учитывая почти линейную зависимость термоЭДС термопары хромель — алюмель от температуры в диапазоне 0 ... 1000 °С, ее часто применяют в терморегуляторах.

В начале работы термопар (в течение 300...400 ч) термоЭДС несколько возрастает по сравнению с первоначальной (на 1,5...2 %). Это связано с процессом рекристаллизации. При дальнейшей выдержке

Т а б л и ц а 8.9. Номинальная статическая характеристика термоматры ХА₈₈ (ГОСТ 3044—77)

Темпера- тура рабочего конца, °С	ТермозДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	-1,889	-1,563	-1,600	-1,636	-1,673	-1,709	-1,745	-1,781	-1,817	-1,853
-40	-1,527	-1,193	-1,231	-1,268	-1,305	-1,342	-1,379	-1,416	-1,453	-1,490
-30	-1,156	-0,815	-0,853	-0,891	-0,929	-0,967	-1,005	-1,043	-1,081	-1,118
-20	-0,777	-0,431	-0,469	-0,508	-0,547	-0,585	-0,624	-0,662	-0,701	-0,739
-10	-0,392	-0,039	-0,079	-0,118	-0,157	-0,197	-0,236	-0,275	-0,314	-0,353
0	-0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,162
30	1,203	1,244	1,285	1,325	1,366	1,407	1,448	1,489	1,529	1,570
40	1,611	1,552	1,693	1,731	1,776	1,817	1,858	1,899	1,940	1,981
50	2,022	2,064	2,105	2,146	2,188	2,229	2,270	2,312	2,353	2,394
60	2,436	2,477	2,519	2,560	2,601	2,643	2,684	2,736	2,767	2,809
70	2,850	2,892	2,933	2,975	3,016	3,058	3,100	3,141	3,183	3,224
80	3,266	3,307	3,349	3,390	3,432	3,473	3,515	3,556	3,598	3,639
90	3,681	3,722	3,764	3,805	3,847	3,888	3,930	3,971	4,012	4,054
100	4,095	4,137	4,178	4,219	4,261	4,302	4,343	4,384	4,426	4,467
110	4,508	4,549	4,590	4,632	4,673	4,714	4,755	4,796	4,837	4,878
120	4,919	4,960	5,001	5,042	5,083	5,124	5,164	5,205	5,246	5,287
130	5,327	5,368	5,409	5,450	5,490	5,531	5,571	5,612	5,652	5,693
140	5,733	5,774	5,814	5,855	5,895	5,936	5,976	6,016	6,057	6,097
150	6,137	6,177	6,218	6,258	6,298	6,338	6,378	6,419	6,459	6,499
160	6,539	6,579	6,619	6,659	6,699	6,739	6,779	6,819	6,859	6,899
170	6,939	6,979	7,019	7,059	7,099	7,139	7,179	7,219	7,259	7,299
180	7,338	7,378	7,418	7,458	7,498	7,538	7,578	7,618	7,658	7,697
190	7,737	7,777	7,817	7,857	7,897	7,937	7,977	8,017	8,057	8,097
200	8,137	8,177	8,217	8,257	8,297	8,337	8,377	8,417	8,457	8,497

210	8,537	8,577	8,617	8,657	8,697	8,737	8,777	8,817	8,857	8,898
220	8,938	8,978	9,018	9,058	9,099	9,139	9,179	9,220	9,260	9,300
230	9,341	9,381	9,421	9,462	9,502	9,543	9,583	9,624	9,664	9,705
240	9,745	9,786	9,826	9,867	9,907	9,948	9,989	10,029	10,070	10,111
250	10,151	10,192	10,233	10,274	10,315	10,355	10,396	10,437	10,478	10,519
260	10,560	10,600	10,641	10,682	10,723	10,764	10,805	10,846	10,887	10,928
270	10,969	11,010	11,051	11,093	11,134	11,175	11,216	11,257	11,298	11,339
280	11,381	11,422	11,463	11,504	11,546	11,587	11,628	11,669	11,711	11,752
290	11,793	11,835	11,876	11,918	11,959	12,000	12,042	12,083	12,125	12,166
300	12,207	12,249	12,290	12,332	12,373	12,415	12,456	12,498	12,539	12,581
310	12,623	12,664	12,706	12,747	12,789	12,831	12,872	12,914	12,955	12,997
320	13,080	13,122	13,164	13,205	13,247	13,289	13,331	13,372	13,414	13,456
330	13,456	13,497	13,539	13,581	13,623	13,665	13,706	13,748	13,790	13,832
340	13,874	13,915	13,957	13,999	14,041	14,083	14,125	14,167	14,208	14,250
350	14,292	14,334	14,376	14,418	14,460	14,502	14,544	14,586	14,628	14,670
360	14,712	14,754	14,796	14,838	14,880	14,922	14,964	15,006	15,048	15,090
370	15,132	15,174	15,216	15,258	15,300	15,342	15,384	15,426	15,468	15,510
380	15,552	15,594	15,636	15,679	15,721	15,763	15,805	15,847	15,889	15,931
390	15,974	16,016	16,058	16,100	16,142	16,184	16,227	16,269	16,311	16,353
400	16,395	16,438	16,480	16,522	16,564	16,607	16,649	16,691	16,733	16,776
410	16,818	16,860	16,902	16,945	16,987	17,029	17,072	17,114	17,156	17,199
420	17,241	17,283	17,326	17,368	17,410	17,453	17,495	17,537	17,580	17,622
430	17,664	17,707	17,749	17,792	17,834	17,876	17,919	17,961	18,004	18,046
440	18,088	18,131	18,173	18,216	18,258	18,301	18,343	18,385	18,428	18,470
450	18,513	18,555	18,598	18,640	18,683	18,725	18,768	18,810	18,853	18,895
460	18,938	18,980	19,023	19,065	19,108	19,150	19,193	19,235	19,278	19,320
470	19,363	19,405	19,448	19,490	19,533	19,576	19,618	19,661	19,703	19,746
480	19,788	19,831	19,873	19,916	19,959	20,001	20,044	20,086	20,129	20,172
490	20,214	20,257	20,299	20,342	20,385	20,427	20,470	20,512	20,555	20,598
500	20,640	20,683	20,725	20,768	20,811	20,853	20,896	20,938	20,981	21,024
510	21,066	21,109	21,152	21,194	21,237	21,280	21,322	21,365	21,407	21,450
520	21,493	21,535	21,578	21,621	21,663	21,706	21,749	21,791	21,834	21,876
530	21,919	21,962	22,004	22,047	22,090	22,132	22,175	22,218	22,260	22,303

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
540	22,346	22,388	22,431	22,473	22,516	22,559	22,601	22,644	22,687	22,729
550	22,772	22,815	22,857	22,900	22,942	22,985	23,028	23,070	23,113	23,156
560	23,198	23,241	23,284	23,326	23,369	23,411	23,454	23,497	23,539	23,582
570	23,624	23,667	23,710	23,752	23,795	23,837	23,880	23,923	23,965	24,008
580	24,050	24,093	24,136	24,178	24,221	24,263	24,306	24,348	24,391	24,434
590	24,476	24,519	24,561	24,604	24,646	24,689	24,731	24,774	24,817	24,859
600	24,902	24,944	24,987	25,029	25,072	25,114	25,157	25,199	25,242	25,284
610	25,327	25,369	25,412	25,454	25,497	25,539	25,582	25,624	25,666	25,709
620	25,751	25,774	25,836	25,879	25,921	25,964	26,006	26,048	26,091	26,133
630	26,176	26,218	26,260	26,303	26,345	26,387	26,430	26,472	26,515	26,557
640	26,599	26,642	26,684	26,726	26,769	26,811	26,853	26,896	26,938	26,980
650	27,022	27,065	27,107	27,149	27,192	27,234	27,276	27,318	27,361	27,403
660	27,445	27,487	27,529	27,572	27,614	27,656	27,698	27,740	27,783	27,825
670	27,867	27,909	27,951	27,993	28,035	28,078	28,120	28,162	28,204	28,246
680	28,288	28,330	28,372	28,414	28,456	28,498	28,540	28,583	28,625	28,667
690	28,709	28,751	28,793	28,835	28,877	28,919	28,961	29,002	29,044	29,086
700	29,128	29,170	29,212	29,254	29,296	29,338	29,380	29,422	29,464	29,505
710	29,547	29,589	29,631	29,673	29,715	29,756	29,798	29,840	29,882	29,924
720	29,965	30,007	30,049	30,091	30,132	30,174	30,216	30,257	30,299	30,341
730	30,383	30,424	30,466	30,508	30,549	30,591	30,632	30,674	30,716	30,757
740	30,799	30,840	30,882	30,924	30,965	31,007	31,048	31,090	31,131	31,173
750	31,214	31,256	31,297	31,339	31,380	31,422	31,463	31,504	31,546	31,587
760	31,629	31,670	31,712	31,753	31,794	31,836	31,877	31,918	31,960	32,001
770	32,042	32,084	32,125	32,166	32,207	32,249	32,290	32,331	32,372	32,414
780	32,455	32,496	32,537	32,578	32,619	32,661	32,702	32,743	32,784	32,825
790	32,866	32,907	32,948	32,990	33,031	33,072	33,113	33,154	33,195	33,236
800	33,277	33,318	33,359	33,400	33,441	33,482	33,523	33,564	33,604	33,645

810	33,686	33,727	33,768	33,809	33,850	33,891	33,931	33,972	34,013	34,054
820	34,095	34,136	34,176	34,217	34,258	34,299	34,339	34,380	34,421	34,461
830	34,502	34,543	34,583	34,624	34,665	34,705	34,746	34,787	34,827	34,868
840	34,909	34,949	34,990	35,030	35,071	35,111	35,152	35,192	35,233	35,273
850	35,314	35,354	35,395	35,435	35,476	35,516	35,557	35,597	35,637	35,678
860	35,718	35,758	35,799	35,839	35,880	35,920	35,960	36,000	36,041	36,081
870	36,121	36,162	36,202	36,242	36,282	36,323	36,363	36,403	36,443	36,483
880	36,524	36,564	36,604	36,644	36,684	36,724	36,764	36,804	36,844	36,885
890	36,925	36,965	37,005	37,045	37,085	37,125	37,165	37,205	37,245	37,285
900	37,325	37,365	37,405	37,445	37,484	37,524	37,564	37,604	37,644	37,684
910	37,724	37,764	37,803	37,843	37,883	37,923	37,963	38,002	38,042	38,082
920	38,122	38,162	38,201	38,241	38,281	38,320	38,360	38,400	38,439	38,479
930	38,519	38,558	38,598	38,638	38,677	38,717	38,756	38,796	38,836	38,875
940	38,915	38,954	38,994	39,033	39,073	39,112	39,152	39,191	39,231	39,270
950	39,310	39,349	39,388	39,428	39,467	39,507	39,546	39,585	39,625	39,664
960	39,703	39,743	39,782	39,821	39,861	39,900	39,939	39,979	40,018	40,057
970	40,096	40,136	40,175	40,214	40,253	40,292	40,332	40,371	40,410	40,449
980	40,488	40,527	40,566	40,605	40,645	40,684	40,723	40,762	40,801	40,840
990	40,879	40,918	40,957	40,996	41,035	41,074	41,113	41,152	41,191	41,230
1000	41,269	41,308	41,347	41,385	41,424	41,463	41,502	41,541	41,580	41,619
1010	41,657	41,696	41,735	41,774	41,813	41,851	41,890	41,929	41,968	42,006
1020	42,045	42,084	42,123	42,161	42,200	42,239	42,277	42,316	42,355	42,393
1030	42,432	42,470	42,509	42,548	42,586	42,625	42,663	42,702	42,740	42,779
1040	42,817	42,856	42,894	42,933	42,971	43,010	43,048	43,087	43,125	43,164
1050	43,202	43,240	43,279	43,317	43,356	43,394	43,432	43,471	43,509	43,547
1060	43,585	43,624	43,662	43,700	43,739	43,777	43,815	43,853	43,891	43,930
1070	43,968	44,006	44,044	44,082	44,121	44,159	44,197	44,235	44,273	44,311
1080	44,349	44,387	44,425	44,463	44,501	44,539	44,577	44,615	44,653	44,691
1090	44,729	44,767	44,805	44,843	44,881	44,919	44,957	44,995	45,033	45,071
1100	45,108	45,146	45,184	45,222	45,260	45,297	45,335	45,373	45,411	45,448

Темпера- тура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1110	45,486	45,524	45,561	45,599	45,637	45,675	45,712	45,750	45,787	45,825
1120	45,863	45,900	45,938	45,975	46,013	46,051	46,088	46,126	46,163	46,201
1130	46,238	46,275	46,313	46,350	46,388	46,425	46,463	46,500	46,537	46,575
1140	46,612	46,649	46,687	46,724	46,761	46,799	46,836	46,873	46,910	46,948
1150	46,985	47,022	47,059	47,096	47,134	47,171	47,208	47,245	47,282	47,319
1160	47,356	47,393	47,430	47,467	47,504	47,541	47,578	47,615	47,652	47,689
1170	47,726	47,763	47,800	47,837	47,874	47,911	47,948	47,985	48,021	48,058
1180	48,095	48,132	48,169	48,205	48,242	48,279	48,316	48,352	48,389	48,426
1190	48,462	48,499	48,536	48,572	48,609	48,645	48,682	48,718	48,755	48,792
1200	48,828	48,865	48,901	48,937	48,974	49,010	49,047	49,083	49,120	49,156
1210	49,192	49,229	49,265	49,301	49,338	49,374	49,410	49,446	49,483	49,519
1220	49,555	49,591	49,627	49,663	49,700	49,736	49,772	49,808	49,844	49,880
1230	49,916	49,952	49,988	50,024	50,060	50,096	50,132	50,168	50,204	50,240
1240	50,276	50,311	50,347	50,383	50,419	50,455	50,491	50,526	50,562	50,598
1250	50,633	50,669	50,705	50,741	50,776	50,812	50,847	50,883	50,919	50,954
1260	50,990	51,025	51,061	51,096	51,132	51,167	51,203	51,238	51,274	51,309
1270	51,344	51,380	51,415	51,450	51,486	51,521	51,556	51,592	51,627	51,662
1280	51,697	51,733	51,768	51,803	51,838	51,873	51,908	51,943	51,979	52,014
1290	52,049	52,084	52,119	52,154	52,189	52,224	52,259	52,294	52,329	52,364
1300	52,398									

Таблица 8.10. Допустимые отклонения показаний термопары ХА₆₈

Диапазон измеряемых температур, °С		Предел допускаемых отклонений		Диапазон измеряемых температур, °С		Предел допускаемых отклонений	
от	до	мВ	°С	от	до	мВ	°С
-50	+300	0,160	3,86	-50	900	0,280	7,00
	400	0,180	4,26		1000	0,300	7,72
	500	0,200	4,69		1100	0,320	8,47
	600	0,220	5,18		1200	0,340	9,32
	700	0,240	5,74		1300	0,360	10,03
	800	0,260	6,34				

до 1000 ч термоЭДС уменьшается, что вызвано изменением физико-химических свойств термоэлектродов в горячей зоне.

При работе термопар в поверхностных слоях термоэлектродов на глубине до 0,3 мм уменьшается концентрация присутствующих в твердом растворе элементов. Это происходит вследствие окисления элементов и диффузионных процессов при температурах выше 700 °С. Изменение степени концентрации элементов в сплаве ведет к изменению параметров кристаллической решетки термоэлектродов.

Термопара хромель — копель (ТХК) обладает большей термоЭДС, чем ТХА, но уступает по жаростойкости и линейности характеристики. Копель (МНМц 43—0,5) — серебристо-белый сплав на медной основе, содержит 42,5—44,0 % (Ni + Co), 0,1—1,0 % Мп. Даже в сухой атмосфере при комнатной температуре на его поверхности быстро образуется окисная пленка, в дальнейшем удовлетворительно предохраняющая сплав от дальнейшего окисления. Номинальная статическая характеристика ТХК приведена в табл. 8.11, а допустимые отклонения показаний — в табл. 8.12.

Технология производства сплавов хромеля, алюмеля и копеля не позволяет получать с требуемой повторимостью термоэлектрические характеристики. Для снижения выбраковки каждую партию проволоки проверяют по термоЭДС в паре с платиной. В зависимости от полученной термоэлектрической характеристики проводники разделяются на партии в четырех классах (табл. 8.13). Термоэлектроды в пары следует выбирать в одном классе.

Термоэлектроды из хромеля и копеля выпускаются промышленностью следующих диаметров: 0,2 ... 0,3; 0,5...0,7; 1,2...1,5; 2,0...3,0; 3,5...5,0 мм. Верхние пределы рабочих температур для этих сплавов в слабоагрессивной среде приведены в табл. 8.14. Цифры без скобок обозначают температуру, при которой термопара может проработать не менее 1000 ч с изменением характеристики не более чем на 1 %. В скобках указаны температуры, при которых аналогичный уход от первоначальной номинальной статической характеристики не более чем на 1 % произойдет не менее чем за 100 ч. Кратковременные измерения в течение 1...2 ч допустимы при температурах, превышающих температуры, указанные в табл. 8.14. Ряд физико-технических и технологических свойств хромеля, алюмеля и копеля приведен в табл. 8.15.

Термопара медь — константан (ТМК) широко применяется во многих странах для измерений не только низких температур 20...273 К), но и температур выше 0 °С. Оба термоэлектрода широко распространены в электротехнике, что обеспечивает доступность. При 400 °С начинается активное окисление медного проводника. Верхняя

Т а б л и ц а 8.11. Номинальная статическая характеристика термомары ХК₆₈ (ГОСТ 3044—77)

Темпера- тура рабочего конца, °С	термод.С, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-50	-3,110	-2,561	-2,622	-2,683	-2,744	-2,805	-2,866	-2,927	-2,988	-3,049
-40	-2,500	-1,951	-2,012	-2,073	-2,134	-2,195	-2,256	-2,317	-2,378	-2,439
-30	-1,890	-1,332	-1,394	-1,456	-1,518	-1,580	-1,642	-1,704	-1,766	-1,828
-20	-1,270	-0,703	-0,766	-0,829	-0,892	-0,955	-1,018	-1,081	-1,144	-1,207
-10	-0,640	-0,064	-0,128	-0,192	-0,256	-0,320	-0,384	-0,448	-0,512	-0,576
0	0,000	0,064	0,128	0,192	0,256	0,321	0,386	0,451	0,516	0,581
10	0,646	0,711	0,776	0,841	0,907	0,973	1,039	1,105	1,171	1,237
20	1,303	1,370	1,437	1,504	1,571	1,638	1,705	1,772	1,840	1,908
30	1,976	2,044	2,112	2,180	2,248	2,316	2,384	2,452	2,520	2,589
40	2,658	2,727	2,796	2,865	2,934	3,003	3,072	3,141	3,210	3,280
50	3,350	3,420	3,490	3,560	3,630	3,700	3,770	3,840	3,910	3,980
60	4,050	4,121	4,192	4,263	4,334	4,405	4,476	4,547	4,618	4,689
70	4,760	4,831	4,902	4,973	5,044	5,115	5,186	5,257	5,327	5,398
80	5,469	5,540	5,611	5,682	5,753	5,824	5,895	5,966	6,037	6,108
90	6,179	6,250	6,322	6,394	6,466	6,538	6,610	6,682	6,754	6,826
100	6,898	6,970	7,043	7,116	7,189	7,262	7,335	7,408	7,481	7,554
110	7,627	7,700	7,774	7,848	7,922	7,996	8,070	8,144	8,218	8,292
120	8,366	8,440	8,515	8,590	8,665	8,740	8,815	8,890	8,965	9,040
130	9,115	9,190	9,265	9,340	9,415	9,490	9,565	9,640	9,715	9,790
140	9,865	9,940	10,016	10,092	10,168	10,244	10,320	10,396	10,472	10,548
150	10,624	10,700	10,777	10,854	10,931	11,008	11,085	11,162	11,239	11,316
160	11,393	11,470	11,548	11,626	11,704	11,782	11,860	11,938	12,016	12,094
170	12,172	12,250	12,329	12,408	12,487	12,566	12,645	12,724	12,803	12,882
180	12,961	13,040	13,120	13,200	13,280	13,360	13,440	13,520	13,600	13,680
190	13,760	13,841	13,922	14,003	14,084	14,165	14,246	14,327	14,408	14,489
200	14,570	14,651	14,732	14,813	14,894	14,975	15,056	15,137	15,218	15,299

210	15,380	15,462	15,544	15,626	15,708	15,790	15,872	15,954	16,036	16,118
220	16,200	16,283	16,366	16,449	16,532	16,615	16,698	16,781	16,864	16,947
230	17,030	17,113	17,195	17,279	17,362	17,445	17,528	17,611	17,694	17,777
240	17,860	17,943	18,026	18,109	18,192	18,275	18,358	18,441	18,524	18,607
250	18,690	18,773	18,856	18,939	19,022	19,105	19,188	19,271	19,354	19,437
260	19,520	19,604	19,688	19,772	19,856	19,940	20,024	20,108	20,192	20,276
270	20,360	20,444	20,528	20,612	20,696	20,780	20,864	20,948	21,032	21,116
280	21,200	21,284	21,368	21,452	21,536	21,620	21,704	21,788	21,872	21,956
290	22,040	22,124	22,208	22,292	22,376	22,460	22,544	22,628	22,712	22,796
300	22,880	22,964	23,048	23,132	23,216	23,300	23,384	23,468	23,552	23,636
310	23,720	23,804	23,888	23,972	24,056	24,140	24,224	24,308	24,392	24,476
320	24,560	24,645	24,730	24,815	24,900	24,985	25,070	25,155	25,240	25,325
330	25,410	25,496	25,582	25,668	25,754	25,840	25,926	26,012	26,098	26,184
340	26,270	26,356	26,442	26,528	26,614	26,700	26,786	26,872	26,958	27,044
350	27,130	27,217	27,304	27,391	27,478	27,565	27,652	27,739	27,826	27,913
360	28,000	28,087	28,174	28,261	28,348	28,435	28,522	28,609	28,696	28,783
370	28,870	28,957	29,044	29,131	29,218	29,305	29,392	29,479	29,566	29,653
380	29,740	29,827	29,914	30,001	30,088	30,175	30,262	30,349	30,436	30,523
390	30,610	30,697	30,784	30,871	30,958	31,045	31,132	31,219	31,306	31,393
400	31,480	31,567	31,654	31,741	31,828	31,915	32,002	32,089	32,176	32,263
410	32,350	32,438	32,526	32,614	32,702	32,790	32,878	32,966	33,054	33,142
420	33,230	33,318	33,405	33,494	33,582	33,670	33,758	33,846	33,934	34,022
430	34,110	34,198	34,286	34,374	34,462	34,550	34,638	34,726	34,814	34,902
440	34,990	35,078	35,166	35,254	35,342	35,430	35,518	35,606	35,694	35,782
450	35,870	35,958	36,046	36,134	36,222	36,310	36,398	36,486	36,574	36,662
460	36,750	36,838	36,926	37,014	37,102	37,190	37,278	37,366	37,454	37,542
470	37,630	37,718	37,806	37,894	37,982	38,070	38,158	38,246	38,334	38,422
480	38,510	38,598	38,686	38,774	38,862	38,950	39,038	39,126	39,214	39,302
490	39,390	39,478	39,566	39,654	39,742	39,830	39,918	40,006	40,094	40,182
500	40,270	40,358	40,446	40,534	40,622	40,710	40,798	40,886	40,974	41,062
510	41,150	41,238	41,326	41,414	41,502	41,590	41,678	41,766	41,854	41,942
520	42,030	42,118	42,206	42,294	42,382	42,470	42,558	42,646	42,734	42,822
530	42,910	42,998	43,086	43,174	43,262	43,350	43,438	43,526	43,614	43,702

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
540	43,790	43,878	43,966	44,054	44,142	44,230	44,318	44,406	44,494	44,582
550	44,670	44,758	44,846	44,934	45,022	45,110	45,198	45,286	45,374	45,462
560	45,550	45,639	45,728	45,817	45,906	45,995	46,084	46,173	46,262	46,351
570	46,440	46,529	46,618	46,707	46,796	46,885	46,974	47,063	47,152	47,241
580	47,330	47,418	47,506	47,594	47,682	47,770	47,858	47,946	48,034	48,122
590	48,210	48,298	48,386	48,474	48,562	48,650	48,738	48,826	48,914	49,002
600	40,090	49,178	49,266	49,354	49,442	49,530	49,618	49,706	49,794	49,882
610	49,970	50,058	50,146	50,234	50,322	50,410	50,498	50,586	50,674	50,762
620	50,850	50,938	51,026	51,114	51,202	51,290	51,378	51,466	51,554	51,642
630	51,730	51,818	51,906	51,994	52,082	52,170	52,258	52,346	52,434	52,522
640	52,610	52,697	52,789	52,871	52,958	53,045	53,132	53,219	53,306	53,393
650	53,480	53,567	53,654	53,741	53,828	53,915	54,002	54,089	54,176	54,263
660	54,350	54,437	54,524	54,611	54,698	54,785	54,872	54,959	55,046	55,133
670	55,220	55,307	55,394	55,481	55,568	55,655	55,742	55,829	55,916	56,003
680	56,090	56,177	56,264	56,351	56,438	56,525	56,612	56,699	56,786	56,873
690	56,960	57,046	57,131	57,218	57,304	57,390	57,476	57,562	57,648	57,734
700	57,820	57,906	57,992	58,078	58,164	58,250	58,336	58,422	58,508	58,594
710	58,680	58,766	58,852	58,938	59,024	59,110	59,196	59,282	59,368	59,454
720	59,540	59,626	59,712	59,798	59,884	59,970	60,056	60,142	60,228	60,314
730	60,400	60,486	60,572	60,658	60,744	60,830	60,916	61,002	61,088	61,174
740	61,260	61,346	61,432	61,518	61,604	61,690	61,776	61,862	61,948	62,034
750	62,120	62,206	62,292	62,378	62,464	62,550	62,636	62,722	62,808	62,894
760	62,980	63,066	63,152	63,238	63,324	63,410	63,496	63,582	63,668	63,754
770	63,840	63,926	64,012	64,098	64,184	64,270	64,356	64,442	64,528	64,614
780	64,700	64,786	64,872	64,958	65,044	65,130	65,216	65,302	65,388	65,474
790	65,560	65,646	65,732	65,818	65,904	65,990	66,076	66,162	66,248	66,334
800	66,420									

Таблица 8.12. Допустимые отклонения показаний термопары ХК₈₈

Диапазон измеряемых температур, °С		Предел допускаемых отклонений		Диапазон измеряемых температур, °С		Предел допускаемых отклонений	
от	до	мВ	°С	от	до	мВ	°С
—50	300	0,200	2,38	—50	600	0,380	4,32
	400	0,260	2,98		700	0,440	5,12
	500	0,320	3,68		800	0,500	5,81

Таблица 8.13. Классификация термоэлектродов (Х, К, А) в зависимости от термоЭДС относительно платины

Температура горячего спая, °С	ТермоЭДС, мВ, для класса			IV
	I	II	III	

Хромель

100	2,74... 2,90	2,76... 2,92	2,78... 2,94	2,80... 2,96
200	5,88... 6,04	5,93... 6,09	5,98... 6,14	6,03... 6,19
300	9,24... 9,40	9,31... 9,47	9,38... 9,54	9,45... 9,61
400	12,65... 12,84	12,76... 12,94	12,86... 13,04	12,96... 13,14
500	16,08... 16,28	16,20... 16,40	16,32... 16,52	16,44... 16,64
600	19,47... 19,69	19,61... 19,83	19,75... 19,97	19,89... 20,11
700	22,80... 23,04	22,95... 23,19	23,10... 23,34	23,25... 23,49
800	26,05... 26,31	26,21... 26,47	26,37... 26,63	26,53... 26,79
900	29,21... 29,49	29,38... 29,66	29,55... 29,83	29,72... 30,00
1000	32,31... 32,61	32,49... 32,79	32,67... 32,97	32,85... 33,15
1100	35,34... 35,66	35,52... 35,84	35,70... 36,02	35,88... 36,20
1200	38,31... 38,65	38,49... 38,83	38,67... 39,01	38,85... 39,19

Алюмель

100	1,20... 1,36	1,18... 1,34	1,16... 1,32	1,14... 1,30
200	2,09... 2,25	2,04... 2,20	1,99... 2,15	1,94... 2,10
300	2,81... 2,97	2,74... 2,90	2,67... 2,83	2,60... 2,76
400	3,56... 3,74	3,46... 3,64	3,36... 3,54	3,26... 3,44
500	4,37... 4,57	4,25... 4,45	4,13... 4,33	4,01... 4,21
600	5,22... 5,44	5,08... 5,30	4,94... 5,16	4,80... 5,02
700	6,11... 6,35	5,96... 6,20	5,81... 6,05	5,66... 5,90
800	7,01... 7,27	6,85... 7,11	6,69... 6,95	6,53... 6,79
900	7,88... 8,16	7,71... 7,99	7,54... 7,82	7,37... 7,65
1000	8,71... 9,01	8,53... 8,83	8,35... 8,65	8,17... 8,47
1100	9,50... 9,82	9,32... 9,64	9,14... 9,46	8,96... 9,28
1200	10,22... 10,56	10,04... 10,38	9,86... 10,20	9,68... 10,02

Копель

100	4,01... 4,25	3,99... 4,23	3,97... 4,21	3,95... 4,19
200	8,58... 8,82	8,53... 8,77	8,48... 8,72	8,43... 8,67
300	13,47... 13,71	13,40... 13,64	13,33... 13,57	13,26... 13,50

Температура горячего спая, °С	ТермоЭДС, мВ, для класса			IV
	I	II	III	
400	18,57...18,91	18,47...18,81	18,37...18,71	18,27...18,61
500	23,76...24,20	23,64...24,08	23,52...23,96	23,40...23,84
600	29,17...29,71	29,03...29,57	28,89...29,43	28,75...29,29
700	34,53...35,17	34,38...35,02	34,23...34,87	34,08...34,72
800	39,87...40,61	39,74...40,45	39,55...40,29	39,39...40,13

Таблица 8.14. Температурные пределы работы термоэлектродов

Сплав	Температура, °С, для диаметра термоэлектрода, мм			
	0,2...0,3	0,5...0,7	1,2...1,5	2,0...3,0...5,0
Хромель Т	600(800)	800(1000)	1000(1100)	1000(1200)
Алюмель	600(800)	800(1000)	1000(1100)	1000(1200)
Копель	500(600)	600(800)	600(800)	600(800)

Таблица 8.15. Физико-технические характеристики термоэлектродов Х, А, К

Характеристика	Хромель	Алюмель	Копель
Температура плавления, °С	1435	1440	1290
Удельное электросопротивление, Ом · мм ² /м	0,6...0,7	0,25...0,35	0,49...0,5
Предел прочности при растяжении, МПа	700	620	400
Твердость по Бринеллю, МПа	1400	1300	900
Относительное удлинение, %	32	30	38
Температура отжига, °С	850...950	850...950	800...850

Т а б л и ц а 8.16. Номинальная статическая характеристика терморы медь — константан

темпера- тура рабочего конца, °C		ТермоЭДС, мВ, для температуры, °C										
		0°	10	20	30	40	50	60	70	80	90	
0	0,000	0,389	0,787	1,194	1,610	2,035	2,467	2,908	3,357	3,813		
1	0,038	0,429	0,827	1,235	1,652	2,078	2,511	2,953	3,402	3,859		
2	0,077	0,468	0,868	1,277	1,694	2,121	2,555	2,997	3,448	3,906		
3	0,116	0,508	0,908	1,318	1,737	2,164	2,599	3,042	3,493	3,952		
4	0,154	0,517	0,949	1,360	1,779	2,207	2,643	3,087	3,539	3,998		
5	0,193	0,587	0,990	1,401	1,824	2,250	2,687	3,132	3,584	4,044		
6	0,232	0,627	1,030	1,443	1,861	2,293	2,731	3,177	3,630	4,091		
7	0,271	0,667	1,071	1,485	1,907	2,336	2,775	3,222	3,676	4,138		
8	0,311	0,707	1,112	1,526	1,949	2,380	2,820	3,267	3,722	4,184		
9	0,350	0,747	1,153	1,568	1,992	2,423	2,864	3,312	3,767	4,230		
α, мкВ/К	38,9	39,8	40,7	41,6	42,5	43,2	44,1	44,9	45,6	46,4		
	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190		
0	4,277	4,749	5,227	5,712	6,204	6,703	7,208	7,719	8,236	8,759		
1	4,324	4,796	5,275	5,761	6,254	6,753	7,258	7,770	8,288	8,812		
2	4,371	4,843	5,323	5,810	6,303	6,803	7,309	7,822	8,340	8,864		
3	4,418	4,891	5,372	5,859	6,353	6,853	7,360	7,874	8,392	8,917		
4	4,465	4,939	5,420	5,908	6,403	6,904	7,411	7,926	8,445	8,970		
5	4,512	4,987	5,469	5,957	6,453	6,954	7,462	7,978	8,497	9,023		
6	4,559	5,035	5,518	6,007	6,503	7,004	7,513	8,029	8,549	9,076		
7	4,606	5,083	5,566	6,056	6,553	7,055	7,565	8,080	8,601	9,129		
8	4,654	5,131	5,615	6,105	6,603	7,106	7,616	8,132	8,654	9,182		
9	4,701	5,179	5,663	6,155	6,653	7,157	7,667	8,184	8,707	9,235		
α, мкВ/К	47,2	47,8	48,5	49,2	49,9	50,5	51,1	51,7	52,3	52,9		

Температура рабочего конца, °C	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °C											
	200	210	220	230	240	250	260	270	280	290		
0	9,288	9,823	10,363	10,909	11,459	12,015	12,575	13,140	13,710	14,285		
1	9,341	9,877	10,417	10,963	11,514	12,071	12,631	13,197	13,768	14,343		
2	9,394	9,931	10,471	11,018	11,569	12,126	12,688	13,254	13,825	14,400		
3	9,448	9,985	10,526	11,073	11,624	12,182	12,744	13,311	13,882	14,458		
4	9,501	10,039	10,580	11,128	11,680	12,238	12,800	13,368	13,939	14,515		
5	9,555	10,093	10,635	11,183	11,735	12,294	12,857	13,425	13,997	14,573		
6	9,608	10,147	10,689	11,238	11,791	12,350	12,913	13,482	14,055	14,631		
7	9,662	10,201	10,744	11,293	11,847	12,406	12,970	13,539	14,112	14,689		
8	9,715	10,255	10,799	11,348	11,903	12,462	13,027	13,596	14,170	14,747		
9	9,769	10,309	10,854	11,403	11,959	12,518	13,083	13,653	14,227	14,805		
α , мкВ/К	53,5	54,0	54,6	55,0	55,6	56,0	56,5	57,0	57,5	57,9		
0	14,864	15,447	16,035	16,626	17,222	17,821	18,425	19,032	19,642	20,257		
1	14,922	15,506	16,094	16,685	17,281	17,881	18,485	19,093	19,704	20,318		
2	14,980	15,564	16,153	16,745	17,341	17,941	18,546	19,154	19,765	20,380		
3	15,038	15,623	16,212	16,804	17,401	18,002	18,607	19,215	19,827	20,442		
4	15,096	15,681	16,271	16,864	17,461	18,062	18,667	19,276	19,888	20,504		
5	15,155	15,740	16,330	16,924	17,521	18,123	18,727	19,337	19,949	20,565		
6	15,213	15,799	16,389	16,983	17,581	18,183	18,788	19,398	20,011	20,627		
7	15,271	15,858	16,449	17,043	17,641	18,243	18,849	19,459	20,072	20,688		
8	15,330	15,917	16,508	17,102	17,701	18,304	18,910	19,520	20,134	20,750		
9	15,388	15,976	16,567	17,162	17,761	18,364	18,971	19,581	20,195	20,812		
α , мкВ/К	58,3	58,8	59,1	59,6	59,9	60,4	60,7	61,0	61,5	61,7		

Таблица 8.17. Номинальная статическая характеристика термопары железо — константан для диапазона температур от —100 до 800 °С

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С					
	—100	—0	+0	100	200	300
0	4,63	0,00	0,00	5,27	10,78	16,33
2	4,71	0,10	0,10	5,38	10,89	16,44
4	4,79	0,20	0,20	5,48	11,00	16,55
6	4,87	0,30	0,30	5,59	11,12	16,66
8	4,95	0,40	0,40	5,70	11,23	16,77
10	5,03	0,50	0,50	5,81	11,34	16,88
12	5,11	0,60	0,61	5,92	11,45	16,99
14	5,19	0,70	0,71	6,03	11,56	17,10
16	5,27	0,80	0,81	6,14	11,67	17,21
18	5,35	0,90	0,91	6,25	11,78	17,32
20	5,42	1,00	1,02	6,36	11,89	17,43
22	5,50	1,09	1,12	6,47	12,00	17,54
24	5,58	1,19	1,22	6,58	12,12	17,65
26	5,65	1,29	1,33	6,68	12,23	17,76
28	5,72	1,39	1,43	6,79	12,34	17,87
30	5,80	1,48	1,54	6,90	12,45	17,98
32	5,87	1,58	1,64	7,01	12,56	18,09
34	5,94	1,67	1,74	7,12	12,67	18,20
36	6,01	1,77	1,85	7,23	12,78	18,32
38	6,08	1,87	1,95	7,34	12,89	18,43
40	6,16	1,96	2,06	7,45	13,01	18,54
42	6,22	2,06	2,16	7,56	13,12	18,65
44	6,29	2,15	2,27	7,67	13,23	18,76
46	6,36	2,24	2,37	7,78	13,34	18,87
48	6,43	2,34	2,48	7,89	13,45	18,98
50	6,50	2,43	2,58	8,00	13,56	19,09
52	6,56	2,52	2,69	8,12	13,67	19,20
54	6,63	2,62	2,80	8,23	13,78	19,31
56	6,69	2,71	2,90	8,34	13,89	19,42
58	6,76	2,80	3,01	8,45	14,00	19,53
60	6,82	2,89	3,11	8,56	14,12	19,64
62	6,88	2,98	3,22	8,67	14,23	19,75
64	6,94	3,07	3,33	8,78	14,34	19,86
66	7,00	3,16	3,43	8,89	14,45	19,97
68	7,06	3,25	3,54	9,00	14,56	20,08
70	7,12	3,34	3,65	9,11	14,67	20,20
72	7,18	3,43	3,76	9,22	14,78	20,31
74	7,24	3,52	3,86	9,33	14,89	20,42
76	7,30	3,60	3,97	9,44	15,00	20,53
78	7,35	3,69	4,08	9,56	15,11	20,65
80	7,40	3,78	4,19	9,67	15,22	20,75
82	7,46	3,87	4,29	9,78	15,33	20,86
84	7,51	3,96	4,40	9,89	15,44	20,97
86	7,56	4,04	4,51	10,00	15,55	21,08
88	7,61	4,13	4,62	10,11	15,66	21,19
90	7,66	4,21	4,73	10,22	15,77	21,30
92	7,71	4,30	4,83	10,34	15,88	21,41

Продолжение табл. 8.17

Температура рабочего конца, °C	термоЭДС, мВ, для температуры, °C					
	-100	-0	+0	100	200	300
94	7,76	4,38	4,94	10,45	16,00	21,52
96	—	4,46	5,05	10,56	16,11	21,63
98	—	4,55	5,16	10,67	16,22	21,74
100	—	4,63	5,27	10,78	16,33	21,85
α , мкВ/К	33,6	46,3	52,7	55,1	55,5	55,2

Температура рабочего конца, °C	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °C				
	400	500	600	700	800
0	21,85	27,39	33,11	39,15	45,53
2	21,96	27,50	33,23	39,28	45,66
4	22,07	27,61	33,35	39,40	45,79
6	22,18	27,73	33,46	39,53	45,92
8	22,29	27,84	33,58	39,65	46,05
10	22,40	27,95	33,70	39,78	46,18
12	22,51	28,07	33,82	39,91	46,30
14	22,62	28,18	33,94	40,03	46,43
16	22,73	28,29	34,05	40,16	46,56
18	22,84	28,40	34,17	40,28	46,69
20	22,95	28,52	34,29	40,41	46,82
22	23,06	28,63	34,41	40,54	46,94
24	23,17	28,74	34,53	40,66	47,07
26	23,28	28,86	34,64	40,79	47,20
28	23,39	28,97	34,76	40,92	47,33
30	23,50	29,08	34,88	41,05	47,46
32	23,61	29,20	35,00	41,17	47,58
34	23,72	29,31	35,12	41,30	47,71
36	23,83	29,42	35,24	41,43	47,84
38	23,94	29,54	35,36	41,56	47,97
40	24,06	29,65	35,48	41,68	48,09
42	24,17	29,76	35,60	41,81	48,22
44	24,28	29,88	35,72	41,94	48,35
46	24,39	29,99	35,84	42,07	48,48
48	24,50	30,11	35,96	42,19	48,60
50	24,61	30,22	36,08	42,32	48,73
52	24,72	30,34	36,20	42,45	48,85
54	24,83	30,45	36,32	42,58	48,98
56	24,94	30,57	36,44	42,70	49,10
58	25,05	30,68	36,56	42,83	49,23
60	25,16	30,80	36,69	42,96	49,36
62	25,27	30,91	36,81	43,09	49,48
64	25,38	31,02	36,93	43,22	49,61
66	25,49	31,14	37,05	43,35	49,73
68	25,60	31,26	37,18	43,48	49,86
70	25,72	31,37	37,30	43,60	49,98

Температура рабочего конца, °C	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °C				
	400	500	600	700	800
72	25,83	31,49	37,42	43,73	—
74	25,94	31,60	37,54	43,86	—
76	26,05	31,72	37,66	43,99	—
78	26,16	31,83	37,79	44,12	—
80	26,27	31,95	37,91	44,25	—
82	26,38	32,06	38,04	44,38	—
84	26,49	32,18	38,16	44,50	—
86	26,61	32,30	38,28	44,63	—
88	26,72	32,41	38,41	44,76	—
90	26,83	32,53	38,53	44,89	—
92	26,94	32,65	38,66	45,02	—
94	27,05	32,76	38,78	45,15	—
96	27,17	32,88	38,90	45,28	—
98	27,28	33,00	39,03	45,40	—
100	27,39	33,11	39,15	45,53	—
α , мкВ/К	55,4	57,2	60,4	63,8	63,6

граница применения ТМК — 600 °C. В диапазоне от 0 до 100 °C медный термоэлектрод в паре с константаном может быть заменен манганиновым. При этом значительно сокращается утечка тепла вдоль положительного термоэлектрода. Номинальная статическая характеристика ТМК в диапазоне от 0 до 400 °C приведена в табл. 8.16.

Термопара железо — константан (ТЖК) применяется достаточно широко, но так же, как и ТМК, в СССР не стандартизирована. Она более устойчива в окислительных средах, чем ТМК, однако вследствие неоднородности железа ее погрешность примерно в два раза больше, чем у ТМК. Номинальная статическая характеристика ТЖК приведена в табл. 8.17.

Термопара хромель — константан применяется в несистемных измерениях. Дифференциальная термоЭДС выше, чем у ТХА, но ниже, чем у ТХК. Константан сохраняет работоспособность при температуре до 800 °C. Максимальная рабочая температура в окислительной среде 1000 °C.

Термопара жеминоль — Р/жеминоль разработана для применения в восстановительных средах при более высоких температурах, чем термопара железо — константан. Термоэлектроды изготовлены на основе никелевых сплавов типа жеминоль, номинально имеют следующий состав: Ni2OCr1Nb (жеминоль — Р) и Ni3Si (жеминоль). Благодаря более высокому содержанию хрома жеминоль — Р более устойчив к окислению, чем хромель, и может применяться почти до 1300 °C. Количественных данных относительно точности и стабильности этой термопары известно мало.

Термопара НХК — НКМ. Положительный термоэлектрод изготовлен на основе сплава никеля с 10 % Cr и 2 % Si, а отрицательный — на основе сплава никеля с 3 % кремния. Термоэлектрические характеристики термопары НХК — НКМ в СССР не стандартизированы и представлены в табл. 8.18. Чувствительность термопары в среднем порядка 36 мкВ/К. Нестабильность термоЭДС при термо-

Т а б л и ц а 8.18. Номинальная статическая характеристика термопары НХК—НКМ

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С										
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
—0	0	—0,32	—0,63	0,93	—1,22	—1,51	—1,78	—	—	—	—
+0	0	0,34	0,68	1,01	1,36	1,70	2,04	2,38	2,72	3,07	3,41
100	3,41	3,76	4,00	4,45	4,79	5,14	5,48	5,83	6,18	6,55	6,68
200	6,88	7,23	7,58	7,94	8,30	8,65	9,01	9,38	9,74	10,08	10,47
300	10,47	10,84	11,21	11,58	11,95	12,33	12,71	13,08	13,46	13,85	14,23
400	14,23	14,62	15,00	15,38	15,77	16,15	16,54	16,92	17,30	17,69	18,07
500	18,07	18,46	18,84	19,22	19,61	19,99	20,38	20,67	21,15	21,51	21,92
600	21,92	22,31	22,69	23,08	23,46	23,85	24,23	24,52	25,00	25,39	25,78
700	25,78	26,17	26,54	26,92	27,10	27,68	28,06	28,44	28,81	29,19	29,56
800	29,56	29,94	30,32	30,69	31,06	31,44	31,81	32,18	32,55	32,92	33,28
900	33,28	33,65	34,02	34,39	34,76	35,13	35,49	35,86	36,22	36,58	36,91
1000	36,91	37,27	37,63	37,99	38,34	38,70	39,06	39,41	39,76	40,11	40,46
1100	40,46	40,81	41,15	41,50	41,84	42,19	42,53	42,87	43,21	43,54	43,88
1200	43,88	44,22	44,55	44,88	45,21	45,54	45,87	46,20	46,52	46,85	47,17
1300	47,17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

электродах диаметром 1,2 мм и температуре 900 °С колеблется до 3 К за 5000 ч, при 1000 °С — 2...6 К за 3000 ч, при 1100 °С — 2...6 К за 1000—1100 ч (в последнем случае она намного меньше, чем нестабильность термоЭДС термопары хромель—алюмель). При более высоких температурах сравнивать нестабильность термоЭДС не представляется возможным. Срок службы термопары НХК—НКМ с электродами диаметром 1,2 мм при 1200 °С примерно 400 ч, а у термопары хромель—алюмель — 75 ч. Диаметр электрода термопары НКМ, проработавшего при 1000 °С более 3000 ч, уменьшается от 1,2 мм до 0,6...0,7 мм, а алюмелевый термоэлектрод диаметром 1,2 мм окисляется насквозь за 1500 ч.

8.5. Термопары для измерения высоких температур

Измерение высоких температур связано с трудностями, обусловленными большими скоростями процессов диффузии, окисления, изменения кристаллической структуры и т. п. Поэтому только платина и ее сплавы с металлами платиновой группы пригодны для длительной эксплуатации в окислительных средах. При этом платина проявляет склонность к выделению из сплавов в виде летучей окиси, которая в определенных условиях восстанавливается до платины. При длительной эксплуатации восстановленная платина образует нитевидные кристаллы, которые могут шунтировать электроды термопары, снижая ее показания. Для инертной среды и вакуума применяются различные тугоплавкие металлы и их сплавы.

Термопара платинородий — платина. В качестве лигатуры для платины обычно применяют родий — серебристо-белый металл платиновой группы, стойкий в окислительной среде до высоких температур, температура плавления 1970 °С.

Термопара платинородий — платина надежна и при работе в вакууме, но менее стабильна в нейтральных средах. Не рекомендуется

применять ее в восстановительных средах. Главные причины нестабильности термоЭДС следующие: загрязнение парами металлов, поступающими из окружающей среды, в частности от защитных чехлов; осаждение сульфидов, силицидов, окислов или карбидов внутри или на поверхности термоэлектродов. Так, содержание железа до 0,1 % в платиновом термоэлектроде при 1000 °С вызывает отклонение термоЭДС на 1,5 мВ, что соответствует изменению температуры более чем на 100 К, а увеличение его содержания до 0,3 % вызывает погрешность 3,62 мВ. Разрушение термопары обычно обусловлено хрупкостью, возникающей при наличии водорода, углерода, серы, фосфора.

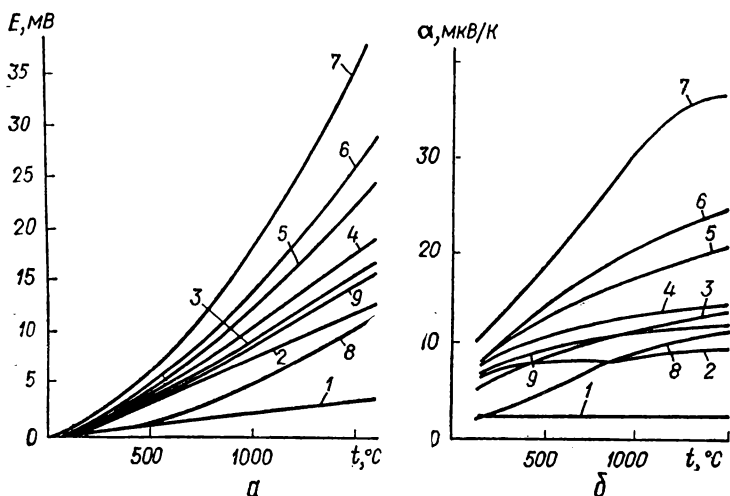


Рис. 8.10. Зависимость от температуры термоЭДС (а) и чувствительности (б) термопар на основе сплавов платины с родием:

1 — PR1/0; 2 — PR6/0; 3 — PR10/0; 4 — PR13/0; 5 — PR30/0 6 — PR100/0; 7 — Pt 20Rh10W/Pt; 8 — PR30/6; 9 — PR13/1.

Наиболее широко распространена термопара с термоэлектродами из сплава платины с 10 % родия относительно электрода из чистой платины. В определении МПТШ-68 она указана как один из интерполяционных приборов и почти всегда используется как стандартная термопара для установления номинальных статических характеристик методом сравнения. Она может применяться для непрерывных измерений на воздухе или в вакууме при температурах до 1400 °С; при нормируемом изменении номинальных статических характеристик — до 1600 °С, для кратковременных измерений — до 1750 °С. Ниже 500 °С дифференциальная термоЭДС становится сравнительно малой, но вследствие исключительной стабильности тем не менее применяется для измерений низких температур. ТермоЭДС термопары медленно убывает со временем из-за уменьшения содержания родия в платинородиевом термоэлектроде и появления следов родия в платиновом термоэлектроде. Номинальная статическая характеристика стандартной термопары платинородий — платина PR10/0 приведена в табл. 8.19, а допустимые отклонения — в табл. 8.20. На рис. 8.10 показана зависимость термоЭДС от содержания родия в платинородиевых сплавах.

Т а б л и ц а 8.19. Градуировочная характеристика термомары ПР 10/0₆₈ (3044—77)

Температура рабочего жидк., °С	ТермоЭДС, мВ, для температур, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,006	0,011	0,017	0,022	0,028	0,033	0,039	0,044	0,050
10	0,056	0,061	0,067	0,073	0,078	0,084	0,090	0,095	0,101	0,107
20	0,113	0,119	0,125	0,131	0,137	0,143	0,149	0,155	0,161	0,167
30	0,173	0,179	0,185	0,191	0,197	0,203	0,209	0,215	0,221	0,228
40	0,234	0,240	0,247	0,253	0,259	0,266	0,272	0,278	0,285	0,291
50	0,297	0,304	0,310	0,317	0,324	0,330	0,337	0,344	0,350	0,356
60	0,363	0,370	0,377	0,384	0,390	0,397	0,404	0,411	0,418	0,424
70	0,431	0,438	0,445	0,452	0,459	0,466	0,473	0,480	0,487	0,494
80	0,501	0,508	0,515	0,522	0,529	0,536	0,543	0,550	0,557	0,565
90	0,572	0,579	0,586	0,593	0,601	0,608	0,615	0,622	0,629	0,637
100	0,644	0,651	0,658	0,666	0,673	0,680	0,688	0,695	0,702	0,710
110	0,717	0,724	0,732	0,739	0,747	0,754	0,762	0,769	0,777	0,784
120	0,792	0,799	0,807	0,815	0,822	0,830	0,838	0,845	0,853	0,861
130	0,869	0,877	0,884	0,892	0,900	0,908	0,916	0,923	0,931	0,939
140	0,947	0,955	0,962	0,970	0,978	0,986	0,994	1,002	1,010	1,018
150	1,026	1,034	1,042	1,050	1,058	1,066	1,074	1,082	1,090	1,098
160	1,106	1,114	1,122	1,130	1,138	1,146	1,154	1,162	1,171	1,179
170	1,187	1,195	1,203	1,212	1,220	1,228	1,236	1,244	1,253	1,261
180	1,269	1,277	1,286	1,294	1,302	1,311	1,319	1,327	1,336	1,344
190	1,352	1,361	1,369	1,377	1,386	1,394	1,402	1,411	1,419	1,427
200	1,436	1,444	1,453	1,461	1,470	1,478	1,487	1,495	1,504	1,512
210	1,521	1,529	1,538	1,546	1,555	1,563	1,572	1,580	1,589	1,597
220	1,606	1,614	1,623	1,632	1,640	1,649	1,658	1,666	1,675	1,684
230	1,692	1,701	1,710	1,718	1,727	1,736	1,744	1,753	1,762	1,770
240	1,779	1,788	1,797	1,806	1,814	1,823	1,832	1,841	1,850	1,858
250	1,867	1,876	1,885	1,894	1,902	1,911	1,920	1,929	1,938	1,946
260	1,955	1,964	1,973	1,982	1,990	1,999	2,008	2,017	2,026	2,034
270	2,043	2,052	2,061	2,070	2,079	2,088	2,097	2,106	2,115	2,124
280	2,133	2,142	2,151	2,160	2,169	2,178	2,187	2,196	2,205	2,214
290	2,223	2,232	2,241	2,250	2,259	2,268	2,277	2,286	2,295	2,304

300	2,314	2,323	2,332	2,341	2,350	2,360	2,369	2,378	2,387	2,396
310	2,406	2,415	2,424	2,433	2,442	2,452	2,461	2,470	2,479	2,488
320	2,498	2,507	2,516	2,525	2,535	2,544	2,553	2,563	2,572	2,581
330	2,591	2,600	2,609	2,618	2,628	2,637	2,646	2,656	2,665	2,674
340	2,684	2,693	2,702	2,711	2,721	2,730	2,739	2,749	2,758	2,767
350	2,777	2,786	2,795	2,805	2,814	2,823	2,833	2,842	2,852	2,861
360	2,871	2,880	2,889	2,899	2,908	2,917	2,927	2,936	2,946	2,955
370	2,965	2,974	2,984	2,993	3,003	3,012	3,022	3,031	3,041	3,050
380	3,060	3,069	3,079	3,088	3,098	3,107	3,117	3,126	3,136	3,145
390	3,155	3,164	3,174	3,183	3,193	3,202	3,212	3,221	3,231	3,240
400	3,250	3,259	3,269	3,278	3,288	3,297	3,307	3,316	3,326	3,335
410	3,345	3,354	3,364	3,373	3,383	3,392	3,402	3,411	3,421	3,430
420	3,440	3,449	3,459	3,469	3,478	3,488	3,498	3,507	3,517	3,527
430	3,536	3,545	3,555	3,565	3,574	3,584	3,594	3,603	3,613	3,623
440	3,632	3,641	3,651	3,661	3,670	3,680	3,690	3,699	3,709	3,719
450	3,728	3,738	3,748	3,758	3,767	3,777	3,787	3,796	3,805	3,816
460	3,825	3,835	3,844	3,854	3,864	3,873	3,883	3,893	3,902	3,912
470	3,922	3,932	3,942	3,951	3,961	3,971	3,981	3,991	4,000	4,010
480	4,020	4,030	4,040	4,049	4,059	4,069	4,079	4,089	4,098	4,108
490	4,118	4,128	4,138	4,147	4,157	4,167	4,177	4,187	4,196	4,206
500	4,216	4,226	4,236	4,246	4,256	4,265	4,275	4,285	4,295	4,305
510	4,315	4,325	4,335	4,345	4,355	4,365	4,374	4,384	4,394	4,404
520	4,414	4,424	4,434	4,444	4,454	4,464	4,474	4,484	4,494	4,504
530	4,514	4,524	4,534	4,544	4,554	4,564	4,574	4,584	4,594	4,604
540	4,614	4,624	4,634	4,644	4,654	4,664	4,674	4,684	4,694	4,704
550	4,714	4,724	4,734	4,744	4,754	4,764	4,774	4,784	4,794	4,804
560	4,814	4,824	4,834	4,844	4,854	4,864	4,874	4,884	4,894	4,904
570	4,914	4,924	4,934	4,944	4,955	4,965	4,975	4,985	4,995	5,005
580	5,015	5,025	5,035	5,045	5,055	5,065	5,076	5,086	5,096	5,106
590	5,116	5,126	5,136	5,146	5,156	5,166	5,176	5,186	5,197	5,208
600	5,218	5,228	5,238	5,249	5,259	5,269	5,279	5,289	5,300	5,310
610	5,320	5,330	5,340	5,351	5,361	5,371	5,381	5,391	5,402	5,412
620	5,422	5,432	5,442	5,453	5,463	5,473	5,484	5,494	5,504	5,515
630	5,525	5,535	5,546	5,556	5,566	5,577	5,587	5,597	5,608	5,618
640	5,628	5,638	5,649	5,659	5,669	5,680	5,690	5,700	5,711	5,721

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
650	5,731	5,742	5,752	5,762	5,773	5,783	5,793	5,804	5,814	5,824
660	5,835	5,845	5,856	5,866	5,876	5,887	5,897	5,907	5,918	5,928
670	5,939	5,949	5,960	5,970	5,981	5,991	6,001	6,012	6,022	6,032
680	6,043	6,053	6,064	6,074	6,085	6,095	6,106	6,116	6,127	6,137
690	6,148	6,158	6,169	6,179	6,190	6,200	6,211	6,221	6,232	6,242
700	6,253	6,263	6,274	6,284	6,295	6,305	6,316	6,326	6,337	6,347
710	6,358	6,368	6,379	6,389	6,400	6,410	6,421	6,431	6,442	6,452
720	6,463	6,473	6,484	6,494	6,505	6,515	6,526	6,536	6,547	6,557
730	6,568	6,578	6,589	6,600	6,610	6,621	6,632	6,642	6,653	6,664
740	6,674	6,685	6,695	6,706	6,717	6,727	6,738	6,749	6,759	6,770
750	6,780	6,791	6,802	6,812	6,823	6,834	6,844	6,855	6,866	6,876
760	6,887	6,898	6,909	6,919	6,930	6,941	6,951	6,962	6,973	6,983
770	6,994	7,005	7,016	7,027	7,037	7,048	7,058	7,069	7,080	7,090
780	7,101	7,112	7,123	7,134	7,144	7,155	7,166	7,177	7,188	7,198
790	7,209	7,220	7,231	7,242	7,252	7,263	7,274	7,285	7,296	7,306
800	7,317	7,328	7,339	7,350	7,361	7,372	7,383	7,394	7,405	7,416
810	7,426	7,437	7,448	7,459	7,470	7,481	7,492	7,503	7,514	7,525
820	7,535	7,546	7,557	7,568	7,579	7,590	7,601	7,612	7,623	7,634
830	7,645	7,656	7,667	7,678	7,689	7,700	7,711	7,722	7,733	7,744
840	7,754	7,765	7,776	7,787	7,798	7,809	7,820	7,831	7,842	7,853
850	7,864	7,875	7,886	7,897	7,908	7,919	7,930	7,941	7,952	7,963
860	7,974	7,985	7,996	8,007	8,018	8,029	8,040	8,051	8,062	8,073
870	8,084	8,095	8,106	8,117	8,128	8,139	8,150	8,161	8,172	8,183
880	8,194	8,205	8,216	8,227	8,238	8,249	8,260	8,271	8,282	8,293
890	8,305	8,316	8,327	8,338	8,349	8,360	8,371	8,382	8,393	8,404
900	8,416	8,427	8,438	8,449	8,460	8,471	8,482	8,493	8,504	8,515
910	8,527	8,538	8,549	8,560	8,571	8,583	8,594	8,605	8,616	8,627
920	8,639	8,650	8,661	8,672	8,683	8,695	8,706	8,717	8,728	8,739
930	8,751	8,762	8,773	8,784	8,796	8,807	8,818	8,830	8,841	8,852
940	8,864	8,875	8,887	8,898	8,909	8,921	8,932	8,943	8,955	8,966

950	8,978	8,989	9,001	9,012	9,023	9,035	9,046	9,058	9,069	9,081
960	9,092	9,103	9,115	9,126	9,137	9,149	9,160	9,171	9,183	9,194
970	9,206	9,217	9,229	9,240	9,251	9,263	9,274	9,285	9,297	9,308
980	9,320	9,331	9,343	9,354	9,366	9,377	9,389	9,400	9,412	9,423
990	9,435	9,446	9,458	9,469	9,481	9,492	9,504	9,515	9,527	9,538
1000	9,550	9,561	9,573	9,584	9,596	9,607	9,619	9,630	9,642	9,653
1010	9,665	9,676	9,688	9,699	9,711	9,722	9,734	9,745	9,757	9,768
1020	9,780	9,791	9,803	9,814	9,826	9,837	9,849	9,860	9,872	9,883
1030	9,895	9,906	9,918	9,930	9,941	9,953	9,965	9,976	9,988	10,000
1040	10,011	10,023	10,036	10,046	10,058	10,070	10,081	10,093	10,105	10,116
1050	10,128	10,140	10,152	10,163	10,175	10,187	10,198	10,210	10,222	10,233
1060	10,245	10,257	10,269	10,280	10,292	10,304	10,315	10,327	10,339	10,350
1070	10,362	10,374	10,385	10,397	10,409	10,420	10,432	10,444	10,455	10,467
1080	10,479	10,491	10,502	10,514	10,526	10,537	10,549	10,561	10,572	10,584
1090	10,596	10,608	10,620	10,631	10,643	10,655	10,667	10,679	10,690	10,702
1100	10,714	10,726	10,738	10,749	10,761	10,773	10,785	10,797	10,808	10,820
1110	10,832	10,844	10,856	10,867	10,879	10,891	10,903	10,915	10,926	10,938
1120	10,950	10,962	10,974	10,985	10,997	11,009	11,021	11,033	11,044	11,056
1130	11,068	11,080	11,092	11,104	11,116	11,128	11,140	11,152	11,163	11,175
1140	11,187	11,199	11,211	11,223	11,235	11,247	11,259	11,271	11,282	11,294
1150	11,306	11,318	11,330	11,342	11,354	11,366	11,378	11,390	11,401	11,413
1160	11,425	11,437	11,449	11,461	11,473	11,485	11,497	11,509	11,520	11,532
1170	11,544	11,556	11,568	11,580	11,592	11,604	11,616	11,628	11,640	11,652
1180	11,664	11,676	11,688	11,700	11,712	11,724	11,736	11,748	11,760	11,772
1190	11,784	11,796	11,808	11,820	11,832	11,844	11,856	11,868	11,880	11,892
1200	11,904	11,916	11,928	11,940	11,952	11,964	11,976	11,988	12,000	12,012
1210	12,024	12,036	12,048	12,060	12,072	12,084	12,096	12,108	12,120	12,132
1220	12,144	12,156	12,168	12,180	12,192	12,204	12,216	12,228	12,240	12,252
1230	12,264	12,276	12,288	12,300	12,312	12,324	12,336	12,348	12,360	12,372
1240	12,384	12,396	12,408	12,420	12,432	12,444	12,456	12,468	12,480	12,492
1250	12,504	12,516	12,528	12,540	12,552	12,564	12,576	12,588	12,600	12,612
1260	12,624	12,636	12,648	12,660	12,672	12,684	12,696	12,708	12,720	12,732
1270	12,744	12,756	12,768	12,780	12,792	12,804	12,816	12,828	12,840	12,852
1280	12,865	12,877	12,889	12,901	12,913	12,925	12,937	12,949	12,961	12,973
1290	12,986	12,998	13,010	13,022	13,034	13,046	13,058	13,070	13,082	13,094
1300	13,107	13,119	13,131	13,143	13,155	13,167	13,179	13,191	13,203	13,215

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1310	13,228	13,240	13,252	13,264	13,276	13,288	13,300	13,312	13,324	13,336
1320	13,349	13,361	13,373	13,385	13,397	13,409	13,421	13,433	13,445	13,457
1330	13,470	13,482	13,494	13,506	13,518	13,530	13,542	13,554	13,566	13,578
1340	13,591	13,603	13,615	13,627	13,639	13,651	13,663	13,675	13,687	13,699
1350	13,712	13,724	13,736	13,748	13,760	13,772	13,784	13,796	13,808	13,820
1360	13,833	13,845	13,857	13,869	13,881	13,893	13,905	13,917	13,929	13,941
1370	13,954	13,966	13,978	13,990	14,002	14,014	14,026	14,038	14,050	14,062
1380	14,075	14,087	14,099	14,111	14,123	14,135	14,147	14,159	14,171	14,183
1390	14,195	14,207	14,219	14,231	14,243	14,255	14,267	14,279	14,291	14,303
1400	14,315	14,327	14,339	14,351	14,363	14,375	14,387	14,399	14,411	14,423
1410	14,435	14,447	14,459	14,471	14,483	14,495	14,507	14,519	14,531	14,543
1420	14,554	14,566	14,578	14,590	14,602	14,614	14,626	14,638	14,650	14,662
1430	14,674	14,686	14,698	14,710	14,722	14,734	14,746	14,758	14,770	14,782
1440	14,794	14,806	14,818	14,830	14,842	14,854	14,866	14,878	14,890	14,902
1450	14,914	14,926	14,938	14,950	14,962	14,974	14,986	14,998	15,010	15,022
1460	15,034	15,046	15,058	15,070	15,082	15,094	15,106	15,118	15,130	15,142
1470	15,154	15,166	15,178	15,190	15,202	15,214	15,226	15,238	15,250	15,261
1480	15,273	15,285	15,297	15,309	15,321	15,333	15,345	15,357	15,369	15,380
1490	15,392	15,404	15,416	15,428	15,440	15,452	15,464	15,476	15,487	15,499
1500	15,511	15,523	15,535	15,547	15,559	15,571	15,583	15,595	15,607	15,618
1510	15,630	15,642	15,654	15,666	15,678	15,690	15,702	15,714	15,726	15,737
1520	15,749	15,761	15,773	15,785	15,796	15,808	15,820	15,832	15,844	15,855
1530	15,867	15,879	15,891	15,903	15,914	15,926	15,938	15,950	15,962	15,973
1540	15,985	15,997	16,009	16,020	16,032	16,044	16,055	16,067	16,079	16,090
1550	16,102	16,114	16,126	16,137	16,149	16,161	16,172	16,184	16,196	16,207
1560	16,219	16,231	16,243	16,254	16,266	16,278	16,289	16,301	16,313	16,324
1570	16,336	16,348	16,360	16,371	16,383	16,395	16,406	16,418	16,430	16,441
1580	16,453	16,465	16,476	16,488	16,500	16,511	16,523	16,535	16,546	16,558
1590	16,569	16,581	16,593	16,604	16,616	16,628	16,639	16,651	16,662	16,674
1600	16,685									

Т а б л и ц а 8.20. Допустимые отклонения показаний термопары ПР 10/0₈₈

Диапазон измеряемых температур, °С		Предел допускаемых отклонений		Диапазон измеряемых температур, °С		Предел допускаемых отклонений	
от	до	мВ	°С	от	до	мВ	°С
0	300	0,010	1,09	0	1000	0,028	2,44
	400	0,013	1,37		1100	0,030	2,54
	500	0,015	1,53		1200	0,033	2,75
	600	0,018	1,75		1300	0,035	2,90
	700	0,020	1,90		1400	0,038	3,16
	800	0,023	2,12		1500	0,040	3,36
	900	0,025	2,25		1600	0,043	3,70

Влияние различных чистых окислов, в среде которых нагревалась термопара ПР 10/0 при 1300 °С, на изменение первоначальных номинальных статических характеристик показано на рис. 8.11: наибольшие погрешности вызывает кварц, наименьшие — окись тория. За 20 ч выдержки при 1300 °С кварц вносил погрешность до 16, а окись тория — до 3 К. Кварц интенсивно взаимодействует с платиновым термоэлектродом и не действует на платинородий. Окись тория не взаимодействует с платинородиевым термоэлектродом и слабо взаимодействует с платиновым термоэлектродом. Окись магния не взаимодействует с платиной и интенсивно реагирует с платинородием. Таким образом, защита рабочих спаев термопары в ПТ при длительном измерении высоких температур кварцевыми наконечниками для термопар ПР 10/0 менее желательна и почти не вносит погрешности в показания термопар ПР 30/6, содержащих родий в обоих термоэлектродах. Для термопары ПР 30/6 защитная керамика из окиси магния нежелательна: но с электродами термопары ПР 10/0 она мало взаимодействует.

Данные, приведенные на рис. 8.11, лишь качественно отражают картину загрязнения термоэлектродов. В практике измерений термоэлектроды контактируют с защитной керамикой на небольших участках, и последняя влияет в гораздо меньшей степени, чем в указанных опытах.

В результате длительного пребывания в окислительной среде при высокой температуре номинальная статическая характеристика термопары ПР 10/0 изменяется. Для восстановления исходных показаний применяют отжиг, длительность которого определяется требованием, чтобы при повторных нагревах в течение 5 мин при 1300 °С

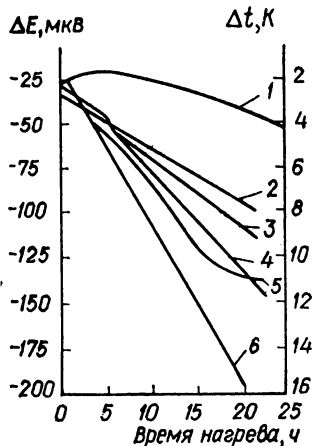


Рис. 8.11. Зависимость изменения термоЭДС термопары ПР10/0 от времени нагрева при 1300 °С в порошках защитной керамики из следующих окислов:

1 — ThO₂; 2 — MgO; 3 — ZrO₂; 4 — Al₂O₃; 5 — CaO; 6 — SiO₂.

обеспечивалась неизменность термоэлектрической характеристики в пределах $\pm 0,005$ мВ.

Термоэлектроды всех термопар платинородиевой группы следует тщательно оберегать от загрязнения жирами, маслами, тщательно обезжиривая их при сборке ПТ. Не рекомендуется применять в качестве изоляции необожженный асбест, отрицательно действующий на термоэлектроды при прямом контакте.

Термопары из платинородиевых сплавов. Для устранения влияния испарения родия на показания термопар предложена термопара ПР 13/1. При измерениях в вакууме она более стабильна и отличается большим сроком службы, чем термопара ПР 10/0 с термоэлектродом из чистой платины. Однако термопара ПР 13/1 не получила большого распространения в СССР. Широко применяются термопары с повышенным содержанием родия: ПР 20/5 и ПР 30/6. Они характеризуются высокой стабильностью и могут быть использованы для непрерывных измерений температуры на воздухе до 1700°C . Номинальная статическая характеристика термопары ПР 20/5 после 200-часового пребывания на воздухе при 1700°C изменяется при 1550°C менее чем на 5 К.

Более высокий предел измерений температур (до 1850°C) достигается при использовании термопары ПР 40/20. Ее удельный коэффициент термоЭДС вдвое меньше, чем у термопары ПР 10/0. После выдержки на воздухе при 1700°C в течение 500 ч ее номинальная статическая характеристика изменяется при 1500°C менее чем на 4 К.

В термопаре ПР 40/20 сочетаются удовлетворительная чувствительность и жаростойкость. Поправка на температуру свободных концов для этой термопары настолько мала, что иногда ею можно пренебречь. Она также обладает высокой стабильностью термоэлектрической характеристики.

Термопара ПР 30/6 применяется для длительных измерений температуры в окислительных средах до 1600°C и кратковременно до 1800°C . При изменении температуры свободных концов от 0°C до 100°C термоЭДС изменяется меньше чем на 50 мкВ. Практическая возможность работы без специальных удлинительных проводов существенно упрощает эксплуатацию этих термопар в заводских условиях. Вследствие пологости характеристики термопары в начальном участке ее нельзя использовать в диапазоне температур до 300°C . Проволока термоэлектродов для термопар ПР 30/6 имеет диаметр 0,3 — 0,5 мм; длина плети не менее 50 м; допускаемая неоднородность термоЭДС по длине куска провода ПР 30 до 7 мкВ, а ПР 6 — до 16 мкВ. Зависимость термоЭДС от температуры рабочего спая при температуре свободных концов 0°C удовлетворительно интерполируется следующей зависимостью:

$$e = \sum_{i=0}^8 d_i t^i, \text{ где } d_0 = 0; d_1 = -2,4674601620 \cdot 10^{-4}; d_2 = 5,9102111169 \cdot 10^{-6}; d_3 = -1,4307123430 \cdot 10^{-8}; d_4 = 2,1509149750 \times 10^{-10}; d_5 = -3,1757800720 \cdot 10^{-12}; d_6 = 2,4010367459 \cdot 10^{-14}; d_7 = -9,0928148159 \cdot 10^{-22}; d_8 = 1,3299505137 \cdot 10^{-25},$$

Номинальная статическая характеристика стандартной термопары ПР 30/6 приведена в табл. 8.21, а допустимые отклонения ее показаний — в табл. 8.22. Снижение показаний относительно первоначальной номинальной статической характеристики для термопар ПР 10/0 и ПР 30/6 при различных температурах и выдержках в окислительной среде приведены в табл. 8.23 и 8.24.

Для измерения температуры до 1800 °С используются также термопары: ПР 100/10 (сплав платины с родием) — чувствительность в диапазоне температур от 0 до 100 °С около нуля, что позволяет не применять специальных удлинительных проводов, при высокой температуре термоЭДС близка к термоЭДС термопар ПР 10/0; ПР 100/40 — при 1800 °С термоЭДС достигает 20 мВ.

Термопары из иридия и родия и их сплавов (ТИР). Среди медленно окисляющихся металлов платиновой группы иридий имеет самую высокую температуру плавления. Это позволяет изготовить термопары для измерения температуры до 2200 °С в окислительных средах. Обычно для термоэлектродов применяют сплав иридия с 50 % родия в паре с чистым иридием (ИР 50/0). Такие термопары быстро изменяют свои характеристики в восстановительных средах. Поэтому их применение целесообразно только в окислительных средах и вакууме.

Срок службы иридиево-родиевой термопары значительно меньше, чем платинородиевой, даже при одинаковых температурах, так как иридий легче, чем платина, окисляется, а окислы легче испаряются. Это ограничивает срок службы иридиевого электрода до 20 ч при 2000 °С на воздухе, но не вызывает нестабильности. При высоких температурах иридий быстро становится хрупким. Загрязнение железом при работе на воздухе для иридиево-родиевой термопары менее опасно, чем для платинородиевой. Главными причинами нестабильности иридиево-родиевой термопары являются неоднородность и структурные изменения при нагреве. Воспроизводимость показаний у этих термопар примерно в два раза хуже, чем у платинородиевых.

Термопары из тугоплавких металлов и их сплавов. К этой группе относятся термопары, диапазон рабочих температур которых простирается за верхний предел применимости описанных выше термопар — 2200 °С. Наиболее пригодными тугоплавкими металлами являются вольфрам, молибден, рений, тантал, ниобий и их сплавы. Тантал и ниобий имеют низкую стабильность термоЭДС, что связано с большой склонностью их к поглощению газов. Поэтому они применяются только для измерений в вакууме.

Термопары из вольфрама и рения и их сплавов (ТВР) наиболее широко распространены. Они применимы только в нейтральной и водородной среде или вакууме. При наличии кислорода электроды окисляются уже при 600 °С. Насыщение углеродом нежелательно, так как образование карбидов вольфрама существенно искажает термоэлектрическую характеристику. В СССР нормализованы стандарты вольфраменневые термоэлектроды с содержанием рения 20 и 5 %. В совокупности они образуют термопару ТВР 5/20. Обусловленный технологическими трудностями разброс в значениях термоэлектрических свойств термоэлектродов привел к необходимости создания трех номинальных статических характеристик (табл. 8.25—8.27). Они различаются допустимым отклонением в показаниях ПТ (табл. 8.29). Для диапазона температур от 1800 до 2500 °С номинальная статическая характеристика ТВР 5/20 приведена в табл. 8.28, однако для этой области температур нет достаточного метрологического обеспечения. Из-за высокого содержания в вольфраменневых сплавах примесей различные партии термоэлектродов значительно отличаются по термоЭДС, хотя в пределах каждой из партий термоЭДС может быть вполне стабильна.

Термопары из вольфрама и молибдена и их сплавов благодаря появлению надежной прогрессивной технологии изготовления термоэлектродов и надлежащей технологии отжига получили значительное распространение. При сравнительно невысо-

Т а б л и ц а 8.21. Номинальная статистическая характеристика термомпары ПР 30/6₈₈ (ГОСТ—77)

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
300	0,443	0,446	0,449	0,452	0,456	0,459	0,462	0,465	0,469	0,472
310	0,475	0,478	0,482	0,485	0,488	0,491	0,495	0,498	0,501	0,505
320	0,508	0,511	0,515	0,518	0,521	0,525	0,528	0,531	0,535	0,538
330	0,542	0,545	0,549	0,552	0,556	0,559	0,563	0,566	0,570	0,573
340	0,577	0,580	0,584	0,588	0,591	0,595	0,599	0,602	0,606	0,610
350	0,613	0,617	0,621	0,624	0,628	0,632	0,635	0,639	0,643	0,646
360	0,650	0,654	0,658	0,661	0,665	0,669	0,673	0,676	0,680	0,684
370	0,688	0,691	0,695	0,699	0,703	0,707	0,711	0,715	0,719	0,723
380	0,727	0,731	0,735	0,739	0,743	0,747	0,751	0,755	0,759	0,763
390	0,767	0,771	0,775	0,779	0,783	0,787	0,791	0,795	0,799	0,803
400	0,808	0,812	0,816	0,820	0,824	0,829	0,833	0,837	0,841	0,845
410	0,850	0,854	0,858	0,862	0,867	0,871	0,875	0,880	0,884	0,888
420	0,893	0,897	0,902	0,906	0,911	0,915	0,920	0,924	0,929	0,933
430	0,938	0,942	0,947	0,951	0,956	0,960	0,965	0,969	0,974	0,978
440	0,983	0,987	0,992	0,997	1,001	1,006	1,011	1,015	1,020	1,025
450	1,029	1,034	1,039	1,043	1,048	1,053	1,057	1,062	1,067	1,071
460	1,076	1,081	1,086	1,090	1,095	1,100	1,105	1,109	1,114	1,119
470	1,124	1,129	1,133	1,138	1,143	1,148	1,153	1,158	1,163	1,168
480	1,173	1,178	1,183	1,188	1,193	1,198	1,203	1,208	1,213	1,218
490	1,223	1,228	1,233	1,238	1,243	1,248	1,253	1,258	1,263	1,268
500	1,274	1,279	1,284	1,289	1,294	1,299	1,304	1,309	1,314	1,319
510	1,325	1,330	1,335	1,340	1,345	1,351	1,356	1,361	1,366	1,371
520	1,377	1,382	1,387	1,393	1,398	1,403	1,409	1,414	1,419	1,425
530	1,430	1,435	1,441	1,446	1,451	1,457	1,462	1,467	1,473	1,478
540	1,484	1,489	1,495	1,500	1,506	1,512	1,517	1,523	1,528	1,534
550	1,540	1,545	1,551	1,557	1,562	1,568	1,574	1,579	1,585	1,591
560	1,596	1,602	1,608	1,613	1,619	1,625	1,630	1,636	1,642	1,647
570	1,653	1,659	1,665	1,671	1,676	1,682	1,688	1,694	1,699	1,705

580	1,710	1,717	1,723	1,728	1,734	1,740	1,746	1,752	1,758	1,764
590	1,770	1,776	1,782	1,788	1,794	1,800	1,806	1,812	1,818	1,824
600	1,830	1,836	1,842	1,848	1,854	1,860	1,866	1,872	1,878	1,884
610	1,891	1,897	1,903	1,909	1,915	1,922	1,928	1,934	1,940	1,946
620	1,953	1,959	1,965	1,971	1,977	1,984	1,990	1,996	2,002	2,008
630	2,015	2,021	2,027	2,034	2,040	2,046	2,053	2,059	2,065	2,072
640	2,078	2,084	2,091	2,097	2,103	2,110	2,116	2,122	2,129	2,135
650	2,142	2,148	2,155	2,161	2,168	2,174	2,181	2,187	2,194	2,200
660	2,207	2,213	2,220	2,226	2,233	2,239	2,246	2,252	2,259	2,265
670	2,272	2,279	2,285	2,292	2,299	2,305	2,312	2,319	2,325	2,332
680	2,339	2,346	2,352	2,359	2,366	2,373	2,379	2,386	2,393	2,400
690	2,407	2,413	2,420	2,427	2,434	2,441	2,448	2,455	2,462	2,469
700	2,476	2,483	2,490	2,497	2,504	2,511	2,518	2,525	2,532	2,539
710	2,546	2,553	2,560	2,567	2,574	2,581	2,588	2,595	2,602	2,609
720	2,616	2,623	2,630	2,637	2,644	2,651	2,658	2,665	2,672	2,679
730	2,687	2,694	2,701	2,708	2,715	2,723	2,730	2,737	2,744	2,751
740	2,759	2,766	2,773	2,780	2,788	2,795	2,802	2,810	2,817	2,824
750	2,832	2,839	2,846	2,854	2,861	2,868	2,876	2,883	2,891	2,898
760	2,906	2,913	2,921	2,928	2,936	2,943	2,951	2,958	2,966	2,973
770	2,981	2,988	2,996	3,004	3,011	3,019	3,027	3,034	3,042	3,050
780	3,057	3,065	3,073	3,080	3,087	3,095	3,103	3,111	3,118	3,125
790	3,132	3,139	3,147	3,155	3,162	3,170	3,178	3,185	3,193	3,201
800	3,208	3,216	3,224	3,232	3,240	3,247	3,255	3,263	3,271	3,279
810	3,287	3,295	3,303	3,311	3,319	3,327	3,335	3,343	3,351	3,359
820	3,367	3,375	3,383	3,391	3,399	3,407	3,415	3,423	3,431	3,439
830	3,447	3,455	3,463	3,471	3,479	3,487	3,495	3,503	3,511	3,519
840	3,527	3,535	3,543	3,551	3,559	3,567	3,575	3,583	3,591	3,599
850	3,608	3,616	3,624	3,632	3,640	3,649	3,657	3,665	3,673	3,681
860	3,690	3,698	3,706	3,715	3,723	3,731	3,740	3,748	3,756	3,765
870	3,773	3,781	3,790	3,798	3,806	3,815	3,823	3,831	3,840	3,848
880	3,856	3,865	3,873	3,881	3,890	3,898	3,906	3,915	3,923	3,931
890	3,940	3,948	3,957	3,965	3,974	3,982	3,991	3,999	4,008	4,016
900	4,025	4,033	4,042	4,051	4,059	4,068	4,077	4,085	4,094	4,103
910	4,111	4,120	4,129	4,137	4,146	4,155	4,163	4,172	4,181	4,189

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
920	4,198	4,207	4,215	4,224	4,233	4,241	4,250	4,259	4,267	4,276
930	4,285	4,294	4,302	4,311	4,320	4,329	4,338	4,346	4,355	4,364
940	4,373	4,382	4,390	4,399	4,408	4,417	4,426	4,435	4,444	4,453
950	4,462	4,471	4,480	4,489	4,498	4,507	4,516	4,525	4,534	4,543
960	4,552	4,561	4,570	4,579	4,588	4,597	4,606	4,615	4,624	4,633
970	4,642	4,651	4,660	4,669	4,678	4,687	4,696	4,705	4,714	4,723
980	4,732	4,741	4,750	4,759	4,768	4,778	4,787	4,796	4,805	4,814
990	4,824	4,833	4,842	4,851	4,860	4,870	4,879	4,888	4,897	4,906
1000	4,916	4,925	4,934	4,943	4,953	4,962	4,971	4,981	4,990	4,999
1010	5,009	5,018	5,027	5,037	5,046	5,055	5,065	5,074	5,083	5,093
1020	5,102	5,111	5,121	5,130	5,139	5,149	5,158	5,167	5,177	5,186
1030	5,196	5,205	5,215	5,224	5,234	5,243	5,253	5,262	5,272	5,281
1040	5,291	5,300	5,310	5,320	5,329	5,339	5,349	5,358	5,368	5,378
1050	5,387	5,397	5,407	5,416	5,426	5,436	5,445	5,455	5,465	5,474
1060	5,484	5,494	5,504	5,513	5,523	5,533	5,543	5,553	5,562	5,572
1070	5,582	5,592	5,602	5,611	5,621	5,631	5,641	5,651	5,660	5,670
1080	5,680	5,690	5,700	5,709	5,719	5,729	5,739	5,749	5,758	5,768
1090	5,778	5,788	5,798	5,808	5,818	5,828	5,838	5,848	5,858	5,868
1100	5,878	5,888	5,898	5,908	5,918	5,928	5,938	5,948	5,958	5,968
1110	5,978	5,988	5,998	6,008	6,018	6,028	6,038	6,048	6,058	6,068
1120	6,078	6,088	6,098	6,109	6,119	6,129	6,139	6,149	6,160	6,170
1130	6,180	6,190	6,200	6,211	6,221	6,231	6,241	6,251	6,262	6,272
1140	6,282	6,292	6,302	6,313	6,323	6,333	6,343	6,353	6,364	6,374
1150	6,384	6,394	6,405	6,415	6,425	6,435	6,446	6,456	6,466	6,476
1160	6,487	6,497	6,507	6,517	6,528	6,538	6,548	6,559	6,569	6,579
1170	6,590	6,600	6,610	6,621	6,631	6,642	6,652	6,663	6,673	6,684
1180	6,694	6,705	6,715	6,726	6,736	6,747	6,757	6,768	6,778	6,789
1190	6,799	6,810	6,820	6,831	6,841	6,852	6,862	6,873	6,883	6,894

1200	6,904	6,915	6,925	6,936	6,946	6,957	6,968	6,978	6,989	7,000
1210	7,010	7,021	7,032	7,042	7,053	7,064	7,074	7,085	7,096	7,106
1220	7,117	7,128	7,138	7,149	7,160	7,170	7,181	7,192	7,202	7,213
1230	7,224	7,234	7,245	7,256	7,266	7,277	7,288	7,298	7,309	7,320
1240	7,331	7,342	7,353	7,363	7,374	7,385	7,396	7,407	7,418	7,428
1250	7,439	7,450	7,461	7,472	7,482	7,493	7,504	7,515	7,526	7,536
1260	7,547	7,558	7,569	7,580	7,590	7,601	7,612	7,623	7,634	7,644
1270	7,655	7,666	7,677	7,688	7,698	7,709	7,720	7,731	7,742	7,753
1280	7,764	7,775	7,786	7,797	7,808	7,819	7,829	7,840	7,851	7,862
1290	7,873	7,884	7,895	7,906	7,917	7,928	7,938	7,949	7,960	7,971
1300	7,982	7,993	8,004	8,015	8,026	8,037	8,048	8,059	8,070	8,081
1310	8,092	8,103	8,114	8,125	8,126	8,147	8,158	8,169	8,180	8,191
1320	8,203	8,214	8,225	8,236	8,247	8,259	8,270	8,281	8,292	8,303
1330	8,315	8,326	8,337	8,348	8,359	8,371	8,382	8,393	8,404	8,415
1340	8,427	8,438	8,449	8,460	8,471	8,483	8,494	8,505	8,516	8,527
1350	8,539	8,550	8,561	8,572	8,584	8,595	8,606	8,618	8,629	8,640
1360	8,652	8,663	8,674	8,686	8,697	8,708	8,720	8,731	8,742	8,754
1370	8,765	8,776	8,788	8,799	8,810	8,822	8,833	8,844	8,856	8,867
1380	8,878	8,890	8,901	8,912	8,924	8,935	8,946	8,958	8,969	8,980
1390	8,992	9,003	9,014	9,026	9,037	9,048	9,060	9,071	9,083	9,094
1400	9,106	9,117	9,128	9,140	9,151	9,162	9,174	9,185	9,197	9,208
1410	9,220	9,231	9,242	9,254	9,265	9,276	9,288	9,299	9,311	9,322
1420	9,334	9,345	9,356	9,368	9,379	9,390	9,402	9,413	9,425	9,436
1430	9,448	9,459	9,471	9,482	9,494	9,505	9,517	9,528	9,540	9,551
1440	9,563	9,574	9,586	9,598	9,609	9,621	9,633	9,644	9,656	9,668
1450	9,679	9,690	9,702	9,714	9,725	9,737	9,749	9,760	9,772	9,784
1460	9,795	9,806	9,818	9,830	9,841	9,853	9,865	9,876	9,888	9,900
1470	9,911	9,922	9,934	9,946	9,957	9,969	9,981	9,992	10,004	10,016
1480	10,027	10,038	10,050	10,062	10,073	10,085	10,097	10,108	10,120	10,132
1490	10,143	10,154	10,166	10,178	10,189	10,201	10,213	10,224	10,236	10,248
1500	10,259	10,271	10,283	10,294	10,306	10,318	10,329	10,341	10,353	10,364
1510	10,376	10,388	10,399	17,411	10,423	10,434	10,446	10,458	10,469	10,481
1520	10,493	10,504	10,516	10,128	10,540	10,551	10,563	10,575	10,586	10,598

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1530	10,610	10,621	10,633	10,645	10,657	10,668	10,680	10,692	10,703	10,715
1540	10,727	10,738	10,750	10,762	10,774	10,785	10,797	10,809	10,820	10,832
1550	10,844	10,855	10,867	10,879	10,891	11,902	10,914	10,926	10,937	10,949
1560	10,961	10,972	10,984	10,996	10,008	11,019	11,031	11,043	11,054	11,066
1570	11,078	11,089	11,101	11,113	11,125	11,136	11,148	11,160	11,171	11,183
1580	11,195	11,206	11,218	11,230	11,242	11,253	11,265	11,277	11,288	11,300
1590	11,312	11,323	11,335	11,347	11,359	11,370	11,382	11,394	11,405	11,417
1600	11,429	11,440	11,452	11,464	11,476	11,487	11,499	11,511	11,522	11,534
1610	11,546	11,557	11,569	11,581	11,593	11,604	11,616	11,628	11,639	11,651
1620	11,663	11,674	11,686	11,698	11,710	11,721	11,733	11,745	11,756	11,768
1630	11,780	11,791	11,803	11,815	11,827	11,838	11,850	11,862	11,873	11,885
1640	11,897	11,908	11,920	11,932	11,944	11,955	11,967	11,979	11,990	12,002
1650	12,014	12,025	12,037	12,049	12,061	12,072	12,084	12,096	12,107	12,119
1660	12,131	12,143	12,155	12,166	12,178	12,190	12,202	12,214	12,225	12,237
1670	12,249	12,261	12,273	12,284	12,296	12,308	12,320	12,332	12,343	12,355
1680	12,367	12,379	12,391	12,402	12,414	12,426	12,438	12,450	12,461	12,473
1690	12,485	12,497	12,509	12,520	12,532	12,544	12,556	12,568	12,579	12,591
1700	12,603	12,615	12,626	12,638	12,650	12,662	12,674	12,685	12,697	12,709
1710	12,721	12,733	12,744	12,756	12,768	12,780	12,792	12,803	12,815	12,827
1720	12,839	12,851	12,862	12,874	12,886	12,898	12,910	12,921	12,933	12,945
1730	12,957	12,969	12,980	12,992	13,004	13,016	13,028	13,039	13,051	13,063
1740	13,075	13,087	13,098	13,110	13,122	13,134	13,146	13,157	13,169	13,181
1750	13,193	13,205	13,216	13,228	13,240	13,252	13,263	13,275	13,287	13,298
1760	13,310	13,322	13,333	13,345	13,357	13,369	13,380	13,392	13,404	13,415
1770	13,427	13,439	13,450	13,462	13,474	13,486	13,497	13,509	13,521	13,532
1780	13,544	13,556	13,567	13,579	13,591	13,603	13,614	13,626	13,638	13,649
1790	13,661	13,673	13,684	13,696	13,708	13,720	13,731	13,743	13,755	13,766
1800	13,778									

Таблица 8.22. Допустимые отклонения показаний термопары ПР 30/6₈₈

Диапазон измеряемых температур, °С		Предел допускаемых отклонений		Диапазон измеряемых температур, °С		Предел допускаемых отклонений	
от	до	мВ	°С	от	до	мВ	°С
0	300	0,010	3,12	0	1100	0,036	3,64
	400	0,013	3,16		1200	0,040	3,75
	500	0,017	3,24		1300	0,043	3,91
	600	0,020	3,26		1400	0,046	4,06
	700	0,023	3,31		1500	0,050	4,24
	800	0,027	3,35		1600	0,053	4,52
	900	0,030	3,47		1700	0,056	4,76
	1000	0,033	3,56		1800	0,060	5,08

Таблица 8.23. Изменение показаний термопары ПР 10/0 относительно первоначального значения

Температура, °С	Снижение показаний, К, при времени выдержки, ч							
	100	500	1000	2000	4000	6000	8000	10000
До 500	0,5	0,8	1,5	1,5	4,5	6,0	7,0	8,0
600	0,7	1,0	1,8	3,5	5,0	6,5	7,5	8,5
700	1,0	1,5	2,5	4,0	5,5	7,0	8,0	9,0
800	1,5	2,0	3,0	4,5	6,0	7,5	8,5	9,5
900	2,0	3,0	4,0	5,5	7,0	8,5	9,5	10,5
1000	2,5	4,5	5,5	7,0	8,5	10,0	11,0	12,0
1100	4,0	6,5	7,5	9,0	10,5	12,0	—	—
1200	6,0	9,0	10,0	—	—	—	—	—
1300	8,5	12,0	—	—	—	—	—	—

Таблица 8.24. Изменение показаний термопары ПР 30/6 относительно первоначального значения

Температура, °С	Снижение показаний, К, для времени выдержки, ч							
	100	500	1000	2000	4000	6000	8000	1000
До 500	1,0	1,5	2,5	4,0	6,5	8,5	10,0	11,0
600	1,5	2,0	3,0	4,5	7,0	9,0	10,5	11,5
700	2,0	2,5	3,5	5,0	7,5	9,5	11,0	12,0
800	2,5	3,0	4,0	5,5	8,0	10,0	11,5	12,5
900	3,0	3,5	4,5	6,0	8,5	10,5	12,0	13,0
1000	4,0	4,5	5,5	7,0	9,5	11,5	13,0	14,0
1100	5,0	5,5	6,5	8,0	10,5	12,5	14,0	15,0
1200	6,0	7,0	8,0	9,5	12,0	14,0	15,5	16,5
1300	7,0	8,5	10,0	11,5	14,0	—	—	—
1400	8,5	10,5	12,0	14,0	—	—	—	—
1500	10,0	13,0	14,5	—	—	—	—	—
1600	11,5	16,0	—	—	—	—	—	—

Т а б л и ц а 8.25. Номинальная статическая характеристика термомпары ВР 5/20₈₈-1 (3044—77)

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,013	0,025	0,037	0,050	0,062	0,074	0,087	0,099	0,111
10	0,124	0,136	0,149	0,161	0,174	0,186	0,199	0,211	0,224	0,237
20	0,250	0,263	0,275	0,288	0,301	0,314	0,327	0,339	0,352	0,365
30	0,378	0,391	0,404	0,417	0,430	0,443	0,456	0,469	0,482	0,495
40	0,508	0,521	0,534	0,548	0,561	0,574	0,587	0,600	0,613	0,627
50	0,640	0,653	0,666	0,680	0,693	0,707	0,720	0,734	0,747	0,761
60	0,774	0,788	0,801	0,815	0,828	0,842	0,855	0,869	0,882	0,896
70	0,910	0,924	0,938	0,951	0,965	0,979	0,993	1,007	1,020	1,034
80	1,048	1,062	1,076	1,090	1,104	1,118	1,132	1,146	1,160	1,174
90	1,188	1,202	1,216	1,231	1,245	1,259	1,273	1,287	1,302	1,316
100	1,330	1,344	1,359	1,373	1,388	1,402	1,417	1,431	1,446	1,460
110	1,475	1,489	1,504	1,519	1,534	1,548	1,563	1,578	1,593	1,607
120	1,622	1,637	1,652	1,667	1,682	1,697	1,711	1,726	1,741	1,756
130	1,771	1,786	1,801	1,816	1,831	1,846	1,862	1,877	1,892	1,907
140	1,922	1,937	1,953	1,968	1,983	1,998	2,014	2,029	2,044	2,059
150	2,075	2,090	2,106	2,121	2,137	2,152	2,168	2,183	2,199	2,214
160	2,230	2,246	2,261	2,277	2,293	2,308	2,324	2,340	2,355	2,371
170	2,387	2,403	2,419	2,435	2,451	2,466	2,482	2,498	2,514	2,530
180	2,546	2,562	2,588	2,594	2,610	2,626	2,643	2,659	2,675	2,691
190	2,707	2,723	2,739	2,755	2,772	2,788	2,804	2,820	2,836	2,853
200	2,869	2,885	2,901	2,918	2,934	2,950	2,967	2,983	2,999	3,016
210	3,032	3,048	3,065	3,081	3,097	3,114	3,130	3,146	3,163	3,179
220	3,195	3,212	3,228	3,244	3,261	3,277	3,293	3,310	3,326	3,342
230	3,359	3,375	3,391	3,408	3,424	3,441	3,457	3,474	3,490	3,507
240	3,523	3,540	3,556	3,573	3,589	3,606	3,622	3,639	3,655	3,672
250	3,688	3,705	3,721	3,738	3,754	3,771	3,787	3,804	3,820	3,837
260	3,853	3,870	3,886	3,903	3,919	3,936	3,952	3,969	3,985	4,002
270	4,019	4,035	4,052	4,069	4,085	4,102	4,119	4,135	4,152	4,169

280	4,185	4,202	4,219	4,235	4,252	4,269	4,285	4,302	4,319	4,335
290	4,352	4,369	4,385	4,402	4,419	4,435	4,452	4,469	4,485	4,502
300	4,519	4,536	4,553	4,569	4,586	4,603	4,620	4,637	4,653	4,670
310	4,687	4,704	4,721	4,737	4,754	4,771	4,788	4,805	4,821	4,838
320	4,855	4,872	4,889	4,906	4,923	4,939	4,956	4,973	4,990	5,007
330	5,024	5,041	5,058	5,075	5,092	5,108	5,125	5,142	5,159	5,176
340	5,193	5,210	5,227	5,244	5,261	5,277	5,294	5,311	5,328	5,345
350	5,362	5,379	5,396	5,413	5,430	5,446	5,463	5,480	5,497	5,514
360	5,531	5,548	5,565	5,582	5,599	5,615	5,632	5,649	5,666	5,683
370	5,700	5,717	5,734	5,751	5,768	5,784	5,801	5,818	5,835	5,852
380	5,869	5,886	5,903	5,920	5,937	5,954	5,971	5,988	6,005	6,022
390	6,039	6,056	6,073	6,090	6,107	6,124	6,141	6,158	6,175	6,192
400	6,209	6,226	6,243	6,260	6,277	6,294	6,311	6,328	6,345	6,362
410	6,379	6,396	6,413	6,430	6,447	6,464	6,481	6,498	6,515	6,532
420	6,549	6,566	6,583	6,600	6,617	6,634	6,651	6,668	6,685	6,702
430	6,719	6,736	6,753	6,770	6,787	6,804	6,821	6,838	6,855	6,872
440	6,889	6,906	6,923	6,940	6,957	6,974	6,991	7,008	7,025	7,042
450	7,059	7,076	7,093	7,110	7,127	7,144	7,161	7,178	7,195	7,212
460	7,229	7,246	7,263	7,280	7,297	7,314	7,331	7,348	7,365	7,382
470	7,399	7,416	7,433	7,450	7,467	7,484	7,501	7,518	7,535	7,552
480	7,569	7,586	7,603	7,620	7,637	7,654	7,671	7,688	7,705	7,722
490	7,739	7,756	7,773	7,790	7,807	7,824	7,841	7,858	7,875	7,892
500	7,909	7,926	7,943	7,960	7,977	7,994	8,010	8,027	8,044	8,061
510	8,078	8,095	8,112	8,129	8,146	8,163	8,180	8,196	8,213	8,230
520	8,247	8,264	8,281	8,298	8,315	8,332	8,348	8,365	8,382	8,399
530	8,416	8,433	8,450	8,467	8,484	8,501	8,517	8,534	8,551	8,568
540	8,585	8,602	8,619	8,636	8,653	8,670	8,686	8,703	8,720	8,737
550	8,754	8,771	8,788	8,805	8,822	8,839	8,855	8,872	8,889	8,906
560	8,923	8,940	8,957	8,974	8,991	9,008	9,024	9,041	9,058	9,075
570	9,092	9,109	9,126	9,143	9,160	9,177	9,193	9,210	9,227	9,244
580	9,261	9,278	9,295	9,312	9,329	9,346	9,362	9,379	9,396	9,413
590	9,430	9,446	9,463	9,480	9,497	9,514	9,531	9,548	9,565	9,582
600	9,598	9,615	9,632	9,648	9,665	9,682	9,698	9,715	9,732	9,748

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
610	9,765	9,782	9,799	9,815	9,832	9,849	9,866	9,882	9,899	9,916
620	9,933	9,950	9,966	9,983	10,000	10,017	10,034	10,050	10,067	10,084
630	10,101	10,118	10,134	10,151	10,168	10,185	10,202	10,218	10,235	10,252
640	10,269	10,286	10,302	10,319	10,336	10,353	10,370	10,386	10,403	10,420
650	10,437	10,454	10,470	10,487	10,504	10,521	10,538	10,554	10,571	10,588
660	10,605	10,622	10,638	10,655	10,672	10,688	10,705	10,722	10,738	10,755
670	10,772	10,789	10,805	10,822	10,839	10,855	10,872	10,889	10,905	10,922
680	10,939	10,956	10,972	10,989	11,006	11,022	11,039	11,056	11,072	11,089
690	11,106	11,123	11,139	11,156	11,173	11,189	11,206	11,223	11,239	11,256
700	11,273	11,290	11,306	11,323	11,340	11,356	11,373	11,390	11,406	11,423
710	11,440	11,456	11,473	11,490	11,506	11,523	11,540	11,556	11,573	11,590
720	11,606	11,622	11,639	11,656	11,672	11,689	11,706	11,722	11,739	11,756
730	11,772	11,788	11,805	11,822	11,838	11,855	11,872	11,888	11,905	11,922
740	11,938	11,954	11,971	11,988	12,004	12,021	12,038	12,054	12,071	12,088
750	12,104	12,121	12,137	12,154	12,170	12,187	12,203	12,220	12,236	12,253
760	12,269	12,286	12,302	12,319	12,335	12,352	12,368	12,385	12,401	12,418
770	12,434	12,451	12,467	12,484	12,500	12,517	12,533	12,550	12,566	12,583
780	12,599	12,616	12,632	12,649	12,665	12,682	12,698	12,715	12,731	12,748
790	12,764	12,781	12,797	12,814	12,830	12,847	12,863	12,880	12,896	12,913
800	12,929	12,945	12,962	12,978	12,995	13,011	13,027	13,044	13,060	13,077
810	13,093	13,109	13,126	13,142	13,159	13,175	13,191	13,208	13,224	13,241
820	13,257	13,273	13,290	13,306	13,323	13,339	13,355	13,372	13,388	13,405
830	13,421	13,437	13,453	13,470	13,486	13,502	13,519	13,535	13,551	13,568
840	13,584	13,600	13,616	13,633	13,659	13,665	13,682	13,698	13,714	13,731
850	13,747	13,763	13,779	13,796	13,812	13,828	13,845	13,861	13,877	13,894
860	13,910	13,926	13,942	13,959	13,975	13,991	14,007	14,023	14,040	14,056
870	14,072	14,088	14,104	14,121	14,137	14,153	14,169	14,185	14,202	14,218
880	14,234	14,250	14,266	14,282	14,298	14,314	14,331	14,347	14,363	14,379
890	14,395	14,411	14,427	14,443	14,459	14,475	14,492	14,508	14,524	14,540

900	14,556	14,572	14,588	14,604	14,620	14,636	14,652	14,668	14,684	14,700
910	14,716	14,732	14,748	14,764	14,780	14,796	14,812	14,828	14,844	14,860
920	14,876	14,892	14,908	14,924	14,940	14,956	14,971	14,987	15,003	15,019
930	15,035	15,051	15,067	15,083	15,099	15,115	15,130	15,146	15,162	15,178
940	15,194	15,210	15,226	15,241	15,257	15,273	15,289	15,305	15,320	15,336
950	15,352	15,368	15,384	15,399	15,415	15,431	15,447	15,463	15,478	15,494
960	15,510	15,526	15,542	15,557	15,572	15,588	15,603	15,619	15,635	15,651
970	15,667	15,683	15,698	15,714	15,730	15,745	15,761	15,777	15,792	15,808
980	15,824	15,839	15,855	15,871	15,886	15,902	15,918	15,933	15,949	15,965
990	15,980	15,995	16,011	16,027	16,042	16,058	16,074	16,089	16,105	16,121
1000	16,136	16,152	16,167	16,183	16,198	16,214	16,229	16,245	16,260	16,276
1010	16,291	16,307	16,322	16,338	16,353	16,369	16,384	16,400	16,415	16,431
1020	16,446	16,462	16,477	16,492	16,508	16,523	16,538	16,554	16,569	16,584
1030	16,600	16,616	16,631	16,646	16,662	16,677	16,692	16,708	16,723	16,738
1040	16,754	16,769	16,784	16,800	16,815	16,830	16,846	16,861	16,876	16,892
1050	16,907	16,922	16,938	16,953	16,968	16,984	16,999	17,014	17,030	17,045
1060	17,060	17,075	17,090	17,106	17,121	17,136	17,151	17,166	17,182	17,197
1070	17,212	17,227	17,242	17,258	17,273	17,288	17,303	17,318	17,334	17,349
1080	17,364	17,379	17,394	17,409	17,424	17,439	17,455	17,470	17,485	17,500
1090	17,515	17,530	17,545	17,560	17,575	17,590	17,606	17,621	17,636	17,651
1100	17,666	17,681	17,696	17,711	17,726	17,741	17,756	17,771	17,786	17,801
1110	17,816	17,831	17,846	17,861	17,876	17,891	17,906	17,921	17,936	17,951
1120	17,966	17,981	17,996	18,011	18,026	18,041	18,055	18,070	18,085	18,100
1130	18,115	18,130	18,145	18,160	18,175	18,190	18,204	18,219	18,234	18,249
1140	18,264	18,279	18,294	18,308	18,323	18,338	18,353	18,368	18,382	18,397
1150	18,412	18,427	18,442	18,456	18,471	18,486	18,501	18,516	18,530	18,545
1160	18,560	18,575	18,589	18,604	18,619	18,634	18,648	18,663	18,678	18,693
1170	18,707	18,722	18,737	18,751	18,766	18,781	18,795	18,810	18,825	18,839
1180	18,854	18,869	18,883	18,898	18,913	18,927	18,942	18,957	18,971	18,986
1190	19,000	19,015	19,029	19,044	19,059	19,073	19,088	19,103	19,117	19,132
1200	19,146	19,161	19,175	19,190	19,204	19,219	19,233	19,248	19,262	19,277
1210	19,291	19,306	19,320	19,335	19,349	19,364	19,378	19,393	19,407	19,422
1220	19,436	19,450	19,465	19,479	19,493	19,508	19,522	19,536	19,551	19,565

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1230	19,580	19,594	19,609	19,623	19,637	19,652	19,666	19,680	19,695	19,709
1240	19,724	19,738	19,752	19,767	19,781	19,795	19,810	19,824	19,838	19,853
1250	19,867	19,881	19,896	19,910	19,924	19,939	19,953	19,967	19,982	19,996
1260	20,010	20,024	20,038	20,053	20,067	20,081	20,095	20,109	20,124	20,138
1270	20,152	20,166	20,180	20,195	20,209	20,223	20,237	20,251	20,266	20,280
1280	20,294	20,308	20,322	20,336	20,350	20,364	20,379	20,393	20,407	20,421
1290	20,435	20,449	20,463	20,477	20,491	20,505	20,520	20,534	20,548	20,562
1300	20,576	20,590	20,604	20,618	20,632	20,646	20,660	20,674	20,688	20,702
1310	20,716	20,730	20,744	20,758	20,772	20,786	20,800	20,814	20,828	20,842
1320	20,856	20,870	20,884	20,898	20,912	20,926	20,940	20,954	20,968	20,982
1330	20,996	21,010	21,024	21,038	21,052	21,066	21,079	21,093	21,107	21,121
1340	21,135	21,149	21,163	21,177	21,191	21,205	21,218	21,232	21,246	21,260
1350	21,274	21,288	21,302	21,316	21,330	21,344	21,358	21,371	21,385	21,393
1360	21,413	21,427	21,441	21,454	21,468	21,482	21,496	21,510	21,523	21,537
1370	21,551	21,565	21,579	21,592	21,606	21,620	21,634	21,648	21,661	21,675
1380	21,689	21,703	21,716	21,730	21,744	21,757	21,771	21,785	21,798	21,812
1390	21,826	21,840	21,853	21,867	21,881	21,894	21,908	21,922	21,935	21,949
1400	21,963	21,976	21,990	22,004	22,017	22,031	22,045	22,058	22,072	22,086
1410	22,099	22,113	22,127	22,140	22,154	22,168	22,181	22,195	22,208	22,222
1420	22,235	22,249	22,262	22,276	22,289	22,303	22,316	22,330	22,343	22,357
1430	22,370	22,384	22,397	22,411	22,424	22,438	22,451	22,465	22,478	22,492
1440	22,505	22,519	22,532	22,545	22,559	22,572	22,585	22,599	22,612	22,625
1450	22,639	22,653	22,666	22,679	22,693	22,706	22,719	22,733	22,746	22,759
1460	22,773	22,786	22,799	22,813	22,826	22,839	22,853	22,866	22,879	22,893
1470	22,906	22,919	22,933	22,946	22,959	22,973	22,986	22,999	23,013	23,026
1480	23,039	23,052	23,065	23,079	23,092	23,105	23,118	23,131	23,145	23,158
1490	23,171	23,184	23,197	23,211	23,224	23,237	23,250	23,263	23,277	23,290
1500	23,303	23,316	23,329	23,342	23,355	23,368	23,382	23,395	23,408	23,421

1510	23,434	23,447	23,460	23,473	23,486	23,499	23,513	23,526	23,539	23,552
1520	23,565	23,578	23,591	23,604	23,617	23,630	23,643	23,656	23,669	23,682
1530	23,695	23,708	23,721	23,734	23,747	23,760	23,773	23,786	23,799	23,812
1540	23,825	23,938	23,851	23,864	23,877	23,890	23,902	23,915	23,928	23,941
1550	23,954	23,967	23,980	23,993	24,006	24,019	24,031	24,044	24,057	24,070
1560	24,083	24,096	24,109	24,121	24,134	24,147	24,160	24,173	24,185	24,198
1570	24,211	24,224	24,237	24,249	24,262	24,275	24,287	24,300	24,313	24,325
1580	24,338	24,350	24,363	24,376	24,388	24,401	24,414	24,426	24,439	24,452
1590	24,464	24,476	24,489	24,502	24,514	24,527	24,540	24,552	24,565	24,578
1600	24,590	24,603	24,615	24,628	24,640	24,653	24,665	24,678	24,690	24,703
1610	24,715	24,728	24,740	24,753	24,765	24,778	24,790	24,803	24,815	24,828
1620	24,840	24,853	24,865	24,877	24,890	24,902	24,914	24,927	24,939	24,951
1630	24,964	24,977	24,989	25,001	25,014	25,026	25,038	25,051	25,063	25,075
1640	25,088	25,100	25,112	25,125	25,137	25,149	25,162	25,174	25,186	25,199
1650	25,211	25,223	25,235	25,248	25,260	25,272	25,285	25,297	25,309	25,322
1660	25,334	25,346	25,358	25,371	25,383	25,395	25,407	25,419	25,432	25,444
1670	25,456	25,468	25,480	25,493	25,505	25,517	25,529	25,541	25,554	25,566
1680	25,578	25,590	25,602	25,614	25,626	25,638	25,651	25,663	25,675	25,687
1690	25,699	25,711	25,723	25,735	25,747	25,759	25,772	25,784	25,796	25,808
1700	25,820	25,832	25,844	25,856	25,868	25,880	25,892	25,904	25,916	25,928
1710	25,940	25,952	25,964	25,976	25,988	26,000	26,012	26,024	26,036	26,048
1720	26,060	26,072	26,084	26,096	26,108	26,120	26,131	26,143	26,155	26,167
1730	26,179	26,191	26,203	26,215	26,227	26,239	26,250	26,262	26,273	26,286
1740	26,298	26,310	26,322	26,333	26,345	26,357	26,369	26,381	26,392	26,404
1750	26,416	26,428	26,440	26,451	26,463	26,475	26,487	26,499	26,510	26,522
1760	26,534	26,546	26,558	26,569	26,581	26,593	26,604	26,616	26,628	26,639
1770	26,651	26,663	26,674	26,686	26,698	26,709	26,721	26,733	26,744	26,756
1780	26,768	26,779	26,791	26,803	26,814	26,826	26,838	26,849	26,861	26,873
1790	26,884	26,896	26,907	26,919	26,930	26,942	26,953	26,965	26,976	26,988
1800	26,999									

Т а б л и ц а 8.26. Номинальная статическая характеристика термоЭДС ВР 5/20₈₈-2 (3044—77)

ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С										
Температура рабочего конца, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,013	0,025	0,038	0,050	0,063	0,075	0,088	0,101	0,113
10	0,125	0,138	0,151	0,163	0,176	0,189	0,201	0,214	0,227	0,239
20	0,252	0,265	0,278	0,291	0,304	0,316	0,329	0,342	0,355	0,368
30	0,381	0,394	0,407	0,420	0,433	0,447	0,460	0,473	0,486	0,499
40	0,512	0,525	0,538	0,552	0,565	0,578	0,592	0,605	0,618	0,632
50	0,645	0,658	0,672	0,685	0,699	0,712	0,726	0,739	0,753	0,766
60	0,780	0,794	0,808	0,821	0,835	0,849	0,862	0,876	0,890	0,903
70	0,917	0,931	0,945	0,959	0,973	0,986	1,000	1,014	1,028	1,042
80	1,056	1,070	1,084	1,098	1,112	1,127	1,141	1,155	1,169	1,183
90	1,197	1,211	1,225	1,240	1,254	1,268	1,283	1,297	1,311	1,326
100	1,340	1,355	1,369	1,384	1,398	1,413	1,427	1,442	1,456	1,471
110	1,486	1,501	1,516	1,531	1,546	1,560	1,575	1,590	1,605	1,620
120	1,635	1,650	1,665	1,680	1,695	1,710	1,725	1,740	1,755	1,770
130	1,786	1,801	1,816	1,832	1,847	1,862	1,878	1,893	1,908	1,924
140	1,939	1,954	1,970	1,985	2,001	2,016	2,032	2,047	2,063	2,078
150	2,094	2,110	2,126	2,141	2,157	2,173	2,188	2,204	2,220	2,235
160	2,251	2,267	2,283	2,299	2,315	2,330	2,346	2,362	2,378	2,394
170	2,410	2,426	2,442	2,458	2,474	2,490	2,506	2,522	2,538	2,554
180	2,571	2,587	2,603	2,620	2,636	2,652	2,669	2,685	2,701	2,718
190	2,734	2,750	2,767	2,783	2,800	2,816	2,833	2,849	2,866	2,882
200	2,899	2,915	2,932	2,948	2,965	2,981	2,998	3,014	3,031	3,047
210	3,064	3,080	3,097	3,113	3,130	3,146	3,163	3,179	3,196	3,212
220	3,229	3,246	3,262	3,279	3,296	3,312	3,329	3,346	3,362	3,379
230	3,395	3,412	3,428	3,445	3,462	3,478	3,495	3,512	3,528	3,545
240	3,561	3,578	3,595	3,611	3,628	3,645	3,661	3,678	3,695	3,711
250	3,728	3,745	3,761	3,778	3,795	3,811	3,828	3,845	3,861	3,878
260	3,895	3,912	3,929	3,945	3,962	3,979	3,996	4,013	4,029	4,046
270	4,063	4,080	4,097	4,113	4,130	4,147	4,164	4,181	4,197	4,214

280	4,231	4,248	4,265	4,282	4,299	4,315	4,332	4,349	4,366	4,383
290	4,400	4,417	4,434	4,451	4,468	4,484	4,501	4,518	4,535	4,552
300	4,569	4,586	4,603	4,620	4,637	4,654	4,671	4,688	4,705	4,722
310	4,739	4,756	4,773	4,790	4,807	4,824	4,841	4,858	4,875	4,892
320	4,909	4,926	4,943	4,960	4,977	4,994	5,011	5,028	5,045	5,062
330	5,080	5,097	5,114	5,131	5,148	5,165	5,182	5,199	5,216	5,233
340	5,251	5,268	5,285	5,302	5,319	5,336	5,353	5,370	5,387	5,404
350	5,422	5,439	5,456	5,473	5,490	5,507	5,524	5,541	5,558	5,575
360	5,593	5,610	5,627	5,644	5,661	5,678	5,695	5,712	5,729	5,746
370	5,764	5,781	5,798	5,815	5,832	5,849	5,866	5,883	5,900	5,917
380	5,935	5,952	5,969	5,986	6,003	6,021	6,038	6,055	6,072	6,089
390	6,107	6,124	6,141	6,158	6,175	6,193	6,210	6,227	6,244	6,261
400	6,279	6,296	6,313	6,330	6,347	6,365	6,382	6,399	6,416	6,433
410	6,451	6,468	6,485	6,502	6,519	6,537	6,554	6,571	6,588	6,605
420	6,623	6,640	6,657	6,674	6,691	6,709	6,726	6,743	6,760	6,777
430	6,795	6,812	6,829	6,846	6,863	6,881	6,898	6,915	6,932	6,949
440	6,967	6,984	7,001	7,018	7,035	7,053	7,070	7,087	7,104	7,121
450	7,139	7,156	7,173	7,190	7,207	7,225	7,242	7,259	7,276	7,293
460	7,311	7,328	7,345	7,362	7,379	7,397	7,414	7,431	7,448	7,465
470	7,483	7,500	7,517	7,534	7,551	7,569	7,586	7,603	7,620	7,637
480	7,655	7,672	7,689	7,706	7,723	7,741	7,758	7,775	7,792	7,809
490	7,827	7,844	7,861	7,878	7,895	7,913	7,930	7,947	7,964	7,981
500	7,999	8,016	8,033	8,050	8,067	8,085	8,102	8,119	8,136	8,153
510	8,171	8,188	8,205	8,222	8,239	8,257	8,274	8,291	8,308	8,325
520	8,342	8,359	8,376	8,393	8,410	8,428	8,445	8,462	8,479	8,496
530	8,513	8,530	8,547	8,564	8,581	8,599	8,616	8,633	8,650	8,667
540	8,684	8,701	8,718	8,735	8,752	8,770	8,787	8,804	8,821	8,838
550	8,855	8,872	8,889	8,906	8,923	8,941	8,958	8,975	8,992	9,009
560	9,026	9,043	9,060	9,077	9,094	9,112	9,129	9,146	9,163	9,180
570	9,197	9,214	9,231	9,248	9,265	9,283	9,300	9,317	9,334	9,351
580	9,368	9,385	9,402	9,419	9,436	9,453	9,470	9,487	9,504	9,521
590	9,538	9,555	9,572	9,589	9,606	9,623	9,640	9,657	9,674	9,691
600	9,708	9,725	9,742	9,759	9,776	9,793	9,810	9,827	9,844	9,861

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
610	9,878	9,895	9,912	9,929	9,946	9,963	9,980	9,997	10,014	10,031
620	10,048	10,065	10,082	10,099	10,116	10,133	10,149	10,166	10,183	10,200
630	10,217	10,234	10,251	10,268	10,285	10,302	10,318	10,335	10,352	10,369
640	10,386	10,403	10,420	10,437	10,454	10,471	10,487	10,504	10,521	10,538
650	10,555	10,572	10,589	10,605	10,622	10,639	10,656	10,673	10,639	10,706
660	10,723	10,740	10,757	10,773	10,790	10,807	10,824	10,841	10,857	10,874
670	10,891	10,908	10,925	10,941	10,958	10,975	10,992	11,009	11,025	11,042
680	11,059	11,076	11,093	11,109	11,126	11,143	11,160	11,177	11,193	11,210
690	11,227	11,244	11,261	11,277	11,294	11,311	11,328	11,345	11,361	11,378
700	11,395	11,412	11,428	11,445	11,462	11,478	11,495	11,512	11,528	11,545
710	11,562	11,579	11,595	11,612	11,629	11,645	11,662	11,679	11,695	11,712
720	11,729	11,746	11,762	11,779	11,796	11,812	11,829	11,846	11,862	11,879
730	11,896	11,913	11,930	11,946	11,963	11,980	11,996	12,013	12,029	12,046
740	12,063	12,080	12,096	12,113	12,130	12,146	12,163	12,180	12,196	12,213
750	12,230	12,246	12,263	12,280	12,296	12,313	12,330	12,346	12,363	12,380
760	12,396	12,412	12,429	12,446	12,462	12,479	12,496	12,512	12,529	12,546
770	12,562	12,578	12,595	12,612	12,628	12,645	12,662	12,678	12,695	12,712
780	12,728	12,744	12,761	12,778	12,794	12,811	12,828	12,844	12,861	12,878
790	12,894	12,910	12,927	12,943	12,960	12,976	12,993	13,009	13,026	13,043
800	13,059	13,075	13,092	13,108	13,125	13,141	13,158	13,174	13,191	13,207
810	13,224	13,240	13,257	13,273	13,290	13,306	13,323	13,339	13,356	13,372
820	13,389	13,405	13,423	13,439	13,456	13,472	13,489	13,504	13,521	13,537
830	13,554	13,571	13,587	13,603	13,620	13,636	13,652	13,669	13,685	13,701
840	13,718	13,735	13,751	13,767	13,784	13,800	13,816	13,833	13,849	13,865
850	13,882	13,898	13,914	13,931	13,947	13,963	13,980	13,996	14,012	14,029
860	14,045	14,061	14,078	14,094	14,110	14,127	14,143	14,159	14,176	14,192
870	14,208	14,224	14,241	14,257	14,273	14,290	14,306	14,322	14,339	14,355
880	14,371	14,387	14,403	14,420	14,436	14,452	14,468	14,484	14,501	14,517
890	14,533	14,549	14,565	14,582	14,598	14,614	14,630	14,646	14,663	14,679

900	14,695	14,711	14,727	14,744	14,760	14,776	14,792	14,808	14,825	14,841
910	14,857	14,873	14,889	14,905	14,921	14,937	14,954	14,970	14,986	15,002
920	15,018	15,034	15,050	15,066	15,082	15,098	15,115	15,131	15,147	15,163
930	15,179	15,195	15,211	15,227	15,243	15,259	15,275	15,291	15,307	15,323
940	15,339	15,355	15,371	15,387	15,403	15,419	15,435	15,451	15,467	15,483
950	15,499	15,515	15,531	15,547	15,563	15,579	15,594	15,610	15,626	15,642
960	15,658	15,674	15,690	15,706	15,722	15,738	15,753	15,769	15,785	15,801
970	15,817	15,833	15,849	15,864	15,880	15,896	15,912	15,928	15,943	15,959
980	15,975	15,991	16,007	16,022	16,038	16,054	16,070	16,086	16,101	16,117
990	16,133	16,149	16,165	16,180	16,196	16,212	16,227	16,243	16,259	16,274
1000	16,290	16,306	16,321	16,337	16,353	16,368	16,384	16,400	16,415	16,431
1010	16,447	16,462	16,478	16,494	16,509	16,525	16,541	16,556	16,572	16,588
1020	16,603	16,618	16,634	16,650	16,665	16,681	16,697	16,712	16,728	16,744
1030	16,769	16,775	16,790	16,806	16,821	16,837	16,852	16,868	16,883	16,899
1040	16,914	16,930	16,945	16,961	16,976	16,992	17,007	17,023	17,038	17,054
1050	17,069	17,085	17,100	17,115	17,131	17,146	17,161	17,177	17,192	17,207
1060	17,223	17,239	17,254	17,269	17,285	17,300	17,315	17,331	17,346	17,361
1070	17,377	17,392	17,407	17,423	17,438	17,453	17,469	17,484	17,499	17,515
1080	17,530	17,545	17,561	17,576	17,591	17,607	17,622	17,637	17,653	17,668
1090	17,683	17,698	17,713	17,728	17,743	17,759	17,774	17,789	17,804	17,819
1100	17,835	17,850	17,865	17,880	17,895	17,911	17,926	17,941	17,956	17,971
1110	17,986	18,001	18,016	18,031	18,046	18,062	18,077	18,092	18,107	18,122
1120	18,137	18,152	18,167	18,182	18,197	18,212	18,227	18,242	18,257	18,272
1130	18,287	18,302	18,317	18,332	18,347	18,362	18,377	18,392	18,407	18,422
1140	18,437	18,452	18,467	18,482	18,497	18,512	18,526	18,541	18,556	18,571
1150	18,586	18,601	18,616	18,631	18,646	18,661	18,675	18,690	18,705	18,720
1160	18,735	18,750	18,765	18,780	18,795	18,809	18,824	18,839	18,854	18,869
1170	18,883	18,898	18,913	18,928	18,943	18,957	18,972	18,987	19,002	19,017
1180	19,031	19,046	19,060	19,075	19,090	19,104	19,119	19,134	19,148	19,163
1190	19,178	19,193	19,207	19,222	19,237	19,251	19,266	19,281	19,295	19,310
1200	19,325	19,339	19,354	19,369	19,383	19,398	19,413	19,427	19,442	19,457
1210	19,471	19,486	19,500	19,515	19,529	19,544	19,559	19,573	19,588	19,603
1220	19,617	19,632	19,646	19,661	19,675	19,690	19,704	19,719	19,733	19,748

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1230	19,762	19,777	19,791	19,806	19,820	19,835	19,849	19,864	19,878	19,893
1240	19,907	19,922	19,936	19,950	19,965	19,979	19,993	20,008	20,022	20,036
1250	20,051	20,066	20,080	20,094	20,109	20,123	20,137	20,152	20,166	20,180
1260	20,195	20,209	20,223	20,238	20,252	20,266	20,281	20,295	20,309	20,324
1270	20,338	20,352	20,367	20,381	20,395	20,410	20,424	20,438	20,453	20,467
1280	20,481	20,495	20,509	20,524	20,538	20,552	20,566	20,580	20,595	20,609
1290	20,623	20,637	20,651	20,666	20,680	20,694	20,708	20,722	20,737	20,751
1300	20,765	20,779	20,793	20,807	20,821	20,835	20,850	20,864	20,878	20,892
1310	20,906	20,920	20,934	20,948	20,962	20,976	20,991	21,005	21,019	21,033
1320	21,047	21,061	21,075	21,089	21,103	21,117	21,132	21,146	21,160	21,174
1330	21,188	21,202	21,216	21,230	21,244	21,258	21,272	21,286	21,300	21,314
1340	21,328	21,342	21,356	21,370	21,384	21,398	21,412	21,426	21,440	21,454
1350	21,468	21,482	21,496	21,510	21,524	21,538	21,552	21,566	21,580	21,594
1360	21,608	21,622	21,636	21,650	21,664	21,678	21,691	21,705	21,719	21,733
1370	21,747	21,761	21,775	21,789	21,803	21,817	21,830	21,844	21,858	21,872
1380	21,886	21,900	21,914	21,928	21,942	21,955	21,969	21,983	21,997	22,011
1390	22,024	22,038	22,052	22,066	22,080	22,093	22,107	22,121	22,135	22,149
1400	22,162	22,176	22,189	22,203	22,217	22,230	22,244	22,258	22,271	22,285
1410	22,299	22,313	22,326	22,340	22,354	22,367	22,381	22,395	22,408	22,422
1420	22,436	22,449	22,463	22,477	22,490	22,504	22,518	22,531	22,545	22,559
1430	22,572	22,585	22,599	22,613	22,626	22,640	22,654	22,667	22,681	22,695
1440	22,708	22,722	22,735	22,749	22,762	22,776	22,789	22,803	22,816	22,830
1450	22,843	22,857	22,870	22,884	22,897	22,911	22,924	22,938	22,951	22,965
1460	22,978	22,992	23,005	23,018	23,032	23,045	23,058	23,072	23,085	23,098
1470	23,112	23,126	23,139	23,152	23,166	23,179	23,192	23,206	23,219	23,232
1480	23,246	23,259	23,272	23,286	23,299	23,312	23,326	23,339	23,352	23,366
1490	23,379	23,392	23,406	23,419	23,432	23,446	23,459	23,472	23,486	23,499
1500	23,512	23,525	23,538	23,551	23,565	23,578	23,591	23,604	23,617	23,630

1510	23,644	23,657	23,670	23,683	23,696	23,710	23,723	23,736	23,749	23,762
1520	23,776	23,789	23,802	23,815	23,828	23,841	23,855	23,868	23,881	23,894
1530	23,907	23,920	23,933	23,946	23,959	23,973	23,986	23,999	24,012	24,025
1540	24,038	24,051	24,064	24,077	24,090	24,103	24,116	24,129	24,142	24,155
1550	24,168	24,181	24,194	24,207	24,220	24,233	24,246	24,259	24,272	24,285
1560	24,298	24,311	24,324	24,337	24,350	24,363	24,375	24,388	24,401	24,414
1570	24,427	24,440	24,453	24,466	24,479	24,491	24,504	24,517	24,530	24,543
1580	24,555	24,568	24,581	24,594	24,607	24,619	24,632	24,645	24,658	24,671
1590	24,683	24,696	24,709	24,721	24,734	24,747	24,759	24,772	24,785	24,797
1600	24,810	24,823	24,835	24,848	24,861	24,873	24,886	24,899	24,911	24,924
1610	24,937	24,949	24,962	24,975	24,987	25,000	25,013	25,025	25,038	25,051
1620	25,063	25,076	25,088	25,101	25,113	25,126	25,138	25,151	25,163	25,176
1630	25,188	25,201	25,213	25,226	25,238	25,251	25,263	25,276	25,288	25,301
1640	25,313	25,326	25,338	25,350	25,363	25,375	25,387	25,400	25,412	25,424
1650	25,437	25,450	25,462	25,474	25,487	25,499	25,511	25,524	25,536	25,548
1660	25,561	25,573	25,585	25,598	25,610	25,622	25,635	25,647	25,659	25,672
1670	25,684	25,696	25,708	25,720	25,732	25,745	25,757	25,769	25,781	25,793
1680	25,806	25,818	25,830	25,842	25,854	25,867	25,879	25,891	25,903	25,915
1690	25,928	25,940	25,952	25,964	25,976	25,988	26,001	26,013	26,025	26,037
1700	26,049	26,061	26,073	26,085	26,097	26,109	26,121	26,133	26,145	26,157
1710	26,169	26,181	26,193	26,205	26,217	26,229	26,241	26,253	26,265	26,277
1720	26,289	26,301	26,313	26,325	26,337	26,349	26,360	26,372	26,384	26,396
1730	26,408	26,420	26,432	26,444	26,456	26,468	26,479	26,491	26,503	26,515
1740	26,527	26,539	26,551	26,563	26,575	26,586	26,598	26,610	26,622	26,634
1750	26,645	26,657	26,669	26,681	26,693	26,704	26,716	26,728	26,740	26,752
1760	26,763	26,775	26,787	26,798	26,810	26,822	26,833	26,845	26,857	26,868
1770	26,880	26,891	26,903	26,915	26,926	26,938	26,950	26,961	26,973	26,985
1780	26,996	27,007	27,019	27,031	27,042	27,054	27,066	27,077	27,089	27,101
1790	27,112	27,124	27,135	27,147	27,158	27,170	27,181	27,193	27,204	27,216
1800	27,227									

Т а б л и ц а 8.27. Номинальная статическая характеристика термомпары ВР 5/20_{ср-3} (3044—77)

Температура расчетного конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,012	0,024	0,037	0,049	0,061	0,074	0,086	0,098	0,111
10	0,123	0,135	0,148	0,160	0,173	0,185	0,198	0,210	0,223	0,235
20	0,248	0,261	0,274	0,286	0,299	0,312	0,324	0,337	0,350	0,362
30	0,375	0,388	0,401	0,414	0,427	0,439	0,452	0,465	0,478	0,491
40	0,504	0,517	0,530	0,543	0,556	0,570	0,583	0,596	0,609	0,622
50	0,635	0,648	0,661	0,675	0,688	0,701	0,715	0,728	0,741	0,755
60	0,768	0,781	0,795	0,808	0,822	0,835	0,849	0,862	0,876	0,889
70	0,903	0,917	0,931	0,944	0,958	0,972	0,985	0,999	1,013	1,026
80	1,040	1,054	1,068	1,082	1,096	1,109	1,123	1,137	1,151	1,165
90	1,179	1,193	1,207	1,221	1,235	1,250	1,264	1,278	1,292	1,306
100	1,320	1,334	1,348	1,363	1,377	1,391	1,406	1,420	1,434	1,449
110	1,463	1,477	1,492	1,506	1,521	1,535	1,550	1,564	1,579	1,593
120	1,608	1,623	1,638	1,652	1,667	1,682	1,696	1,711	1,726	1,740
130	1,755	1,770	1,785	1,800	1,815	1,829	1,844	1,859	1,874	1,889
140	1,904	1,919	1,934	1,949	1,964	1,980	1,995	2,010	2,025	2,040
150	2,055	2,070	2,085	2,101	2,116	2,131	2,147	2,162	2,177	2,193
160	2,208	2,223	2,239	2,254	2,270	2,285	2,301	2,316	2,332	2,347
170	2,363	2,379	2,395	2,410	2,426	2,442	2,457	2,473	2,489	2,504
180	2,520	2,536	2,552	2,568	2,584	2,599	2,615	2,631	2,647	2,663
190	2,679	2,695	2,711	2,727	2,743	2,760	2,776	2,792	2,808	2,824
200	2,840	2,856	2,872	2,888	2,904	2,921	2,937	2,953	2,969	2,985
210	3,001	3,017	3,033	3,049	3,065	3,082	3,098	3,114	3,130	3,146
220	3,162	3,178	3,194	3,210	3,226	3,243	3,259	3,275	3,291	3,307
230	3,324	3,340	3,356	3,372	3,388	3,405	3,421	3,437	3,453	3,469
240	3,486	3,502	3,518	3,535	3,551	3,567	3,584	3,600	3,616	3,633
250	3,649	3,665	3,681	3,698	3,714	3,730	3,747	3,763	3,779	3,796
260	3,812	3,828	3,845	3,861	3,878	3,894	3,911	3,927	3,944	3,960
270	3,976	3,992	4,009	4,025	4,042	4,058	4,075	4,091	4,108	4,124

280	4,140	4,156	4,173	4,189	4,206	4,222	4,239	4,255	4,272	4,288
290	4,305	4,321	4,338	4,354	4,371	4,387	4,404	4,420	4,437	4,453
300	4,470	4,487	4,503	4,520	4,536	4,553	4,569	4,586	4,602	4,620
310	4,636	4,653	4,669	4,686	3,702	4,719	4,735	4,752	4,768	4,785
320	4,802	4,819	4,835	4,852	4,868	4,885	4,901	4,918	4,934	4,951
330	4,968	4,985	5,002	5,018	5,035	5,052	5,068	5,085	5,102	5,118
340	5,135	5,152	5,169	5,185	5,202	5,219	5,235	5,252	5,269	5,285
350	5,302	5,319	5,336	5,352	5,369	5,386	5,402	5,419	5,436	5,452
360	5,469	5,486	5,503	5,519	5,536	5,553	5,569	5,586	5,603	5,619
370	5,636	5,653	5,670	5,686	5,703	5,720	5,736	5,753	5,770	5,786
380	5,803	5,820	5,837	5,854	5,871	5,887	5,904	5,921	5,938	5,955
390	5,971	5,988	6,005	6,022	6,039	6,055	6,072	6,089	6,106	6,123
400	6,139	6,156	6,173	6,190	6,207	6,223	6,240	6,257	6,274	6,291
410	6,308	6,325	6,342	6,359	6,376	6,392	6,409	6,426	6,443	6,460
420	6,477	6,494	6,511	6,528	6,545	6,561	6,578	6,595	6,612	6,629
430	6,646	6,663	6,680	6,697	6,714	6,730	6,747	6,764	6,781	6,798
440	6,815	6,832	6,849	6,866	6,883	6,899	6,916	6,933	6,950	6,967
450	6,984	7,001	7,018	7,035	7,052	7,068	7,085	7,102	7,119	7,136
460	7,153	7,170	7,187	7,204	7,221	7,237	7,254	7,271	7,288	7,305
470	7,322	7,339	7,356	7,373	7,390	7,406	7,423	7,440	7,457	7,474
480	7,491	7,508	7,525	7,542	7,559	7,575	7,592	7,609	7,626	7,643
490	7,680	7,677	7,694	7,711	7,728	7,744	7,761	7,778	7,795	7,812
500	7,829	7,846	7,863	7,880	7,897	7,913	7,930	7,947	7,964	7,981
510	7,998	8,015	8,032	8,049	8,066	8,082	8,099	8,116	8,133	8,150
520	8,167	8,184	8,201	8,218	8,235	8,251	8,268	8,285	8,302	8,319
530	8,335	8,352	8,369	8,386	8,403	8,419	8,436	8,453	8,470	8,487
540	8,503	8,520	8,537	8,554	8,571	8,587	8,604	8,621	8,638	8,655
550	8,671	8,688	8,705	8,722	8,739	8,755	8,772	8,789	8,806	8,823
560	8,839	8,856	8,873	8,890	8,907	8,923	8,940	8,957	8,974	8,991
570	9,007	9,024	9,041	9,057	9,074	9,091	9,107	9,124	9,141	9,157
580	9,174	9,191	9,208	9,224	9,241	9,258	9,274	9,291	9,308	9,324
590	9,341	9,358	9,375	9,391	9,408	9,425	9,441	9,458	9,475	9,491

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
600	9,508	9,524	9,541	9,558	9,574	9,591	9,608	9,624	9,641	9,658
610	9,674	9,690	9,707	9,724	9,740	9,757	9,774	9,790	9,807	9,824
620	9,840	9,856	9,873	9,890	9,906	9,923	9,940	9,956	9,973	9,990
630	10,006	10,022	10,039	10,056	10,072	10,089	10,106	10,122	10,139	10,156
640	10,172	10,188	10,205	10,222	10,238	10,255	10,272	10,288	10,305	10,322
650	10,338	10,354	10,371	10,388	10,404	10,421	10,438	10,454	10,471	10,488
660	10,504	10,520	10,537	10,553	10,570	10,586	10,603	10,619	10,636	10,652
670	10,669	10,685	10,702	10,718	10,735	10,751	10,768	10,784	10,801	10,817
680	10,834	10,850	10,867	10,883	10,900	10,916	10,933	10,949	10,966	10,982
690	10,999	11,015	11,032	11,048	11,065	11,081	11,098	11,114	11,131	11,147
700	11,164	11,180	11,197	11,213	11,230	11,246	11,263	11,279	11,296	11,312
710	11,329	11,345	11,362	11,378	11,395	11,411	11,428	11,444	11,461	11,476
720	11,493	11,509	11,526	11,542	11,559	11,575	11,592	11,608	11,625	11,641
730	11,657	11,673	11,690	11,706	11,723	11,739	11,756	11,772	11,789	11,805
740	11,821	11,837	11,854	11,870	11,887	11,903	11,920	11,936	11,953	11,969
750	11,985	12,001	12,017	12,034	12,050	12,066	12,083	12,099	12,115	12,132
760	12,148	12,164	12,180	12,197	12,213	12,229	12,246	12,262	12,278	12,295
770	12,311	12,337	12,343	12,360	12,376	12,392	12,409	12,425	12,441	12,458
780	12,474	12,490	12,506	12,523	12,539	12,555	12,572	12,588	12,604	12,621
790	12,637	12,653	12,669	12,686	12,702	12,718	12,735	12,751	12,767	12,784
800	12,800	12,816	12,832	12,849	12,865	12,881	12,898	12,914	12,930	12,947
810	12,963	12,979	12,995	13,012	13,028	13,044	13,061	13,077	13,093	13,110
820	13,126	13,142	13,158	13,174	13,190	13,207	13,223	13,239	13,255	13,271
830	13,288	13,304	13,320	13,336	13,352	13,369	13,385	13,401	13,417	13,433
840	13,450	13,466	13,482	13,498	13,514	13,531	13,547	13,563	13,579	13,595
850	13,612	13,628	13,644	13,660	13,676	13,693	13,709	13,725	13,741	13,757
860	13,773	13,789	13,805	13,821	13,837	13,854	13,870	13,886	13,902	13,918
870	13,934	13,950	13,966	13,982	13,998	14,015	14,031	14,047	14,063	14,079

880	14,095	14,112	14,127	14,143	14,159	14,175	14,191	14,207	14,223	14,239
890	14,255	14,271	14,287	14,303	14,319	14,335	14,351	14,367	14,383	14,399
900	14,415	14,431	14,447	14,463	14,479	14,494	14,510	14,526	14,542	14,558
910	14,574	14,590	14,606	14,622	14,638	14,653	14,669	14,685	14,701	14,717
920	14,733	14,749	14,765	14,781	14,797	14,812	14,828	14,844	14,860	14,876
930	14,891	14,907	14,923	14,938	14,954	14,970	14,985	15,001	15,017	15,032
940	15,048	15,064	15,080	15,095	15,111	15,127	15,142	15,158	15,174	15,189
950	15,205	15,220	15,236	15,252	15,267	15,283	15,299	15,314	15,330	15,346
960	15,361	15,376	15,392	15,408	15,423	15,439	15,455	15,470	15,486	15,502
970	15,517	15,533	15,548	15,564	15,579	15,595	15,610	15,626	15,641	15,657
980	15,672	15,688	15,703	15,719	15,734	15,750	15,765	15,781	15,796	15,812
990	15,827	15,842	15,858	15,873	15,889	15,904	15,920	15,935	15,951	15,966
1000	15,981	15,996	16,011	16,027	16,042	16,057	16,073	16,088	16,103	16,119
1010	16,135	16,150	16,165	16,181	16,196	16,211	16,227	16,242	16,257	16,273
1020	16,288	16,303	16,318	16,333	16,349	16,364	16,379	16,395	16,410	16,425
1030	16,441	16,456	16,471	16,486	16,502	16,517	16,532	16,547	16,563	16,578
1040	16,593	16,608	16,623	16,638	16,654	16,669	16,684	16,699	16,715	16,730
1050	16,745	16,760	16,775	16,790	16,805	16,821	16,836	16,851	16,866	16,881
1060	16,896	16,911	16,926	16,941	16,956	16,972	16,987	17,002	17,017	17,032
1070	17,047	17,062	17,077	17,092	17,107	17,123	17,138	17,153	17,168	17,183
1080	17,198	17,213	17,228	17,243	17,258	17,273	17,288	17,303	17,318	17,333
1090	17,348	17,363	17,378	17,393	17,408	17,423	17,438	17,453	17,468	17,483
1100	17,498	17,513	17,528	17,543	17,558	17,573	17,588	17,603	17,618	17,633
1110	17,648	17,663	17,678	17,693	17,708	17,722	17,737	17,752	17,767	17,782
1120	17,797	17,812	17,827	17,842	17,857	17,871	17,886	17,901	17,916	17,931
1130	17,946	17,961	17,976	17,991	18,006	18,020	18,035	18,050	18,065	18,080
1140	18,094	18,109	18,124	18,139	18,154	18,168	18,183	18,198	18,213	18,228
1150	18,242	18,257	18,272	18,286	18,301	18,316	18,330	18,345	18,360	18,374
1160	18,389	18,404	18,418	18,433	18,448	18,462	18,477	18,492	18,506	18,521
1170	18,536	18,551	18,565	18,580	18,595	18,609	18,624	18,639	18,653	18,668
1180	18,683	18,697	18,712	18,727	18,741	18,756	18,771	18,785	18,800	18,815
1190	18,829	18,843	18,858	18,873	18,887	18,902	18,917	18,931	18,946	18,961
1200	18,975	19,990	19,004	19,019	19,033	19,048	19,062	19,077	19,091	19,106

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1210	19,120	19,135	19,149	19,164	19,178	19,193	19,207	19,222	19,236	19,251
1220	19,265	19,280	19,294	19,308	19,323	19,337	19,351	19,366	19,380	19,394
1230	19,409	19,424	19,438	19,452	19,467	19,481	19,495	19,510	19,524	19,538
1240	19,553	19,567	19,581	19,596	19,610	19,624	19,639	19,653	19,667	19,682
1250	19,696	19,710	19,725	19,739	19,753	19,768	19,782	19,796	19,811	19,825
1260	19,839	19,853	19,867	19,881	19,896	19,910	19,924	19,938	19,952	19,966
1270	19,981	19,995	20,009	20,023	20,037	20,052	20,066	20,080	20,094	20,108
1280	20,123	20,137	20,151	20,165	20,179	20,193	20,208	20,222	20,236	20,250
1290	20,264	20,278	20,292	20,306	20,320	20,334	20,349	20,363	20,377	20,391
1300	20,405	20,419	20,433	20,447	20,461	20,475	20,489	20,503	20,517	20,531
1310	20,545	20,559	20,573	20,587	20,601	20,615	20,628	20,642	20,656	20,670
1320	20,684	20,698	20,712	20,725	20,739	20,753	20,767	20,781	20,794	20,808
1330	20,822	20,836	20,850	20,863	20,877	20,891	20,905	20,919	20,932	20,946
1340	20,960	20,974	20,987	21,001	21,015	21,028	21,042	21,056	21,069	21,083
1350	21,097	21,110	21,124	21,138	21,151	21,165	21,179	21,192	21,206	21,220
1360	21,233	21,246	21,260	21,274	21,287	21,301	21,315	21,328	21,342	21,356
1370	21,369	21,383	21,396	21,410	21,423	21,437	21,450	21,464	21,477	21,491
1380	21,504	21,518	21,531	21,545	21,558	21,572	21,585	21,599	21,612	21,626
1390	21,639	21,653	21,666	21,679	21,693	21,706	21,719	21,733	21,746	21,759
1400	21,773	21,787	21,800	21,813	21,827	21,840	21,853	21,867	21,880	21,893
1410	21,907	21,921	21,934	21,947	21,961	21,974	21,987	22,001	22,014	22,027
1420	22,041	22,055	22,068	22,081	22,095	22,108	22,121	22,135	22,148	22,161
1430	22,175	22,188	22,201	22,215	22,228	22,241	22,255	22,268	22,281	22,295
1440	22,308	22,321	22,335	22,348	22,361	22,375	22,388	22,401	22,414	22,428
1450	22,441	22,454	22,467	22,481	22,494	22,507	22,520	22,534	22,547	22,560
1460	22,574	22,587	22,600	22,614	22,627	22,640	22,653	22,666	22,680	22,693
1470	22,706	22,719	22,732	22,746	22,759	22,772	22,785	22,798	22,812	22,825
1480	22,838	22,851	22,864	22,877	22,890	22,903	22,917	22,930	22,943	22,956

1490	22,969	22,982	22,995	23,008	23,021	23,034	23,048	23,061	23,074	23,087
1500	23,100	23,113	23,126	23,139	23,152	23,165	23,179	23,192	23,205	23,218
1510	23,231	23,244	23,257	23,270	23,283	23,296	23,309	23,322	23,335	23,348
1520	23,361	23,374	23,387	23,400	23,413	23,426	23,439	23,452	23,465	23,478
1530	23,491	23,504	23,517	23,530	23,543	23,556	23,568	23,581	23,594	23,607
1540	23,620	23,633	23,646	23,658	23,671	23,684	23,697	23,710	23,722	23,735
1550	23,748	23,761	23,774	23,786	23,799	23,812	23,825	23,838	23,850	23,863
1560	23,876	23,889	23,902	23,914	23,927	23,940	23,952	23,965	23,978	23,990
1570	24,003	24,015	24,028	24,041	24,053	24,066	24,079	24,091	24,104	24,117
1580	24,129	24,141	24,154	24,167	24,179	24,192	24,205	24,217	24,230	24,243
1590	24,255	24,268	24,280	24,293	24,305	24,318	24,330	24,343	24,355	24,368
1600	24,380	24,393	24,405	24,418	24,430	24,443	24,455	24,468	24,480	24,493
1610	24,505	24,518	24,530	24,542	24,555	24,567	24,579	24,592	24,604	24,616
1620	24,629	24,641	24,653	24,666	24,678	24,690	24,703	24,715	24,727	24,740
1630	24,752	24,764	24,777	24,789	24,801	24,814	24,826	24,838	24,851	24,863
1640	24,875	24,887	24,899	24,912	24,924	24,936	24,948	24,960	24,973	24,985
1650	24,997	25,009	25,021	25,034	25,046	25,058	25,070	25,082	25,095	25,107
1660	25,119	25,131	25,143	25,155	25,167	25,179	25,192	25,204	25,216	25,228
1670	25,240	25,252	25,264	25,276	25,288	25,300	25,312	25,324	25,336	25,348
1680	25,360	25,372	25,384	25,396	25,408	25,420	25,432	25,444	25,456	25,468
1690	25,480	25,492	25,504	25,516	25,528	25,540	25,551	25,563	25,575	25,587
1700	25,599	25,611	25,623	25,635	25,647	25,659	25,670	25,682	25,694	25,706
1710	25,718	25,730	25,742	25,753	25,765	25,777	25,789	25,801	25,812	25,824
1720	25,836	25,848	25,860	25,871	25,883	25,895	25,907	25,919	25,930	25,942
1730	25,954	25,966	25,978	25,989	26,001	26,013	26,025	26,037	26,048	26,060
1740	26,072	26,084	26,095	26,107	26,119	26,131	26,142	26,154	26,166	26,178
1750	26,189	26,201	26,213	26,224	26,236	26,248	26,259	26,271	26,283	26,294
1760	26,306	26,317	26,329	26,341	26,352	26,364	26,376	26,387	26,399	26,411
1770	26,422	26,433	26,445	26,457	26,468	26,480	26,492	26,503	26,515	26,527
1780	26,538	26,550	26,561	26,573	26,584	26,596	26,607	26,619	26,630	26,642
1790	26,653	26,665	26,676	26,688	26,699	26,711	26,722	26,734	26,745	26,757
1800	26,768									

Т а б л и ц а 8.28. Номинальная усредненная статистическая характеристика термомары ВР 5/20₈₈ (3044—77)

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1800	26,999	27,011	27,022	27,033	27,045	27,056	27,067	27,079	27,090	27,101
1810	27,113	27,124	27,135	27,147	27,158	27,169	27,181	27,192	27,203	27,215
1820	27,226	27,237	27,248	27,260	27,271	27,282	27,294	27,305	27,316	27,328
1830	27,339	27,350	27,361	27,372	27,383	27,395	27,406	27,417	27,428	27,439
1840	27,451	27,462	27,473	27,484	27,495	27,507	27,518	27,529	27,540	27,551
1850	27,563	26,574	27,585	27,596	27,607	27,619	27,630	27,641	27,652	27,663
1860	27,675	27,686	27,697	27,708	27,719	27,730	27,742	27,753	27,764	27,775
1870	27,786	27,797	27,808	27,819	27,830	27,841	27,853	27,864	27,875	27,886
1880	27,897	27,908	27,919	27,930	27,941	27,952	27,963	27,974	27,985	27,996
1890	28,007	28,018	28,029	28,040	28,051	28,062	28,073	28,084	28,095	28,106
1900	28,117	28,128	28,139	28,150	28,161	28,171	28,182	28,193	28,204	28,215
1910	28,226	28,237	28,248	28,259	28,270	28,280	28,291	28,302	28,313	28,324
1920	28,334	28,345	28,356	28,367	28,378	28,388	28,399	28,410	28,421	28,432
1930	28,442	28,453	28,464	28,474	28,485	28,496	28,506	28,517	28,528	28,538
1940	28,549	28,560	28,571	28,581	28,592	28,603	28,613	28,624	28,635	28,645
1950	28,656	28,666	28,677	28,688	28,698	28,709	28,720	28,730	28,741	28,752
1960	28,762	28,773	28,783	28,794	28,804	28,815	28,825	28,836	28,846	28,857
1970	28,867	28,877	28,888	28,898	28,909	28,919	28,930	28,940	28,951	28,961
1980	28,971	28,981	28,991	29,002	29,012	29,022	29,033	29,043	29,053	29,064
1990	29,074	29,084	29,094	29,104	29,114	29,125	29,135	29,145	29,155	29,165
2000	29,177	29,187	29,197	29,207	29,217	29,228	29,238	29,248	29,258	29,268
2010	29,279	29,289	29,299	29,309	29,319	29,330	29,340	29,350	29,360	29,370

2020	29,381	29,391	29,401	29,411	29,421	29,432	29,442	29,452	29,462	29,472
2030	29,453	29,493	29,503	29,513	29,523	29,533	29,544	29,554	29,564	29,574
2040	29,584	29,594	29,604	29,614	29,624	29,634	29,645	29,655	29,665	29,675
2050	29,685	29,695	29,705	29,715	29,725	29,735	29,746	29,756	29,766	20,776
2060	29,786	29,796	29,806	29,816	29,826	29,836	29,846	29,856	29,866	29,876
2070	29,886	29,896	29,906	29,916	29,926	29,936	29,946	29,956	29,966	29,976
2080	29,986	29,996	30,006	30,016	30,026	30,036	30,046	30,056	30,066	30,076
2090	30,086	30,096	30,106	30,116	30,126	30,136	30,145	30,155	30,165	30,175
2100	30,185	30,195	30,205	30,215	30,225	30,234	30,244	30,254	30,264	30,274
2110	30,284	30,294	30,304	30,313	30,323	30,333	30,343	30,353	30,362	30,372
2120	30,382	30,392	30,402	30,411	30,421	30,431	30,441	30,451	30,460	30,469
2130	30,473	30,488	30,498	30,508	30,517	30,527	30,537	30,546	30,556	30,566
2140	30,575	30,585	30,594	30,604	30,613	30,623	30,632	30,642	30,651	30,661
2150	30,670	30,680	30,689	30,699	30,708	30,718	30,727	30,737	30,746	30,756
2160	30,765	30,775	30,784	30,793	30,803	30,812	30,821	30,831	30,840	30,849
2170	30,859	30,868	30,877	30,887	30,896	30,905	30,915	30,924	30,935	30,943
2180	30,952	30,961	30,970	30,979	30,988	30,998	31,007	31,016	31,025	31,034
2190	31,044	31,053	31,062	31,071	31,080	31,090	31,099	31,108	31,117	31,126
2200	31,136	31,145	31,154	31,163	31,172	31,181	31,190	31,200	31,209	31,218
2210	31,227	31,236	31,245	31,254	31,263	31,272	31,282	31,291	31,300	31,309
2220	31,318	31,327	31,336	31,345	31,354	31,363	31,372	31,381	31,390	31,399
2230	31,408	31,417	31,426	31,435	31,444	31,453	31,462	31,471	31,480	31,489
2240	31,498	31,507	31,516	31,525	31,534	31,542	31,551	31,560	31,569	31,578
2250	31,587	31,596	31,605	31,614	31,623	31,631	31,640	31,649	31,658	31,667
2260	31,676	31,685	31,694	31,702	31,711	31,720	31,729	31,738	31,746	31,755
2270	31,764	31,773	31,782	31,791	31,799	31,808	31,817	31,826	31,834	31,843

Температура рабочего конца, °С	ТермоЭДС, мВ, для температуры, °С									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
2280	31,852	31,861	31,870	31,878	31,887	31,896	31,904	31,913	31,921	31,930
2290	31,939	31,948	31,957	31,965	31,974	31,983	31,991	32,000	32,009	32,017
2300	32,026	32,034	32,043	32,052	32,060	32,069	32,078	32,086	32,095	32,104
2310	32,112	32,121	32,129	32,138	32,146	32,155	32,163	32,172	32,180	32,189
2320	32,197	32,206	32,214	32,222	32,231	32,239	32,247	32,256	32,264	32,272
2330	32,281	32,290	32,298	32,306	32,315	32,323	32,331	32,340	32,348	32,356
2340	32,365	32,374	32,383	32,392	32,400	32,408	32,417	32,425	32,433	32,441
2350	32,448	32,456	32,464	32,473	32,481	32,489	32,498	32,506	32,514	32,523
2360	32,531	32,539	32,547	32,555	32,563	32,572	32,580	32,588	32,596	32,604
2370	32,613	32,621	32,639	32,637	32,645	32,654	32,662	32,670	32,678	32,686
2380	32,695	32,703	32,711	32,719	32,727	32,736	32,744	32,752	32,760	32,768
2390	32,776	32,784	32,792	32,800	32,808	32,817	32,825	32,833	32,841	32,849
2400	32,857	32,865	32,873	32,881	32,889	32,897	32,905	32,913	32,921	32,929
2410	32,937	32,945	32,953	32,961	32,969	32,977	32,985	32,993	33,001	33,009
2420	33,017	33,025	33,033	33,041	33,049	33,056	33,064	33,072	33,080	33,088
2430	33,096	33,104	33,112	33,120	33,128	33,135	33,143	33,151	33,159	33,167
2440	33,175	33,183	33,191	33,199	33,207	33,214	33,222	33,230	33,238	33,246
2450	33,253	33,261	33,269	33,277	33,285	33,292	33,300	33,308	33,316	33,324
2460	33,331	33,339	33,347	33,354	33,362	33,370	33,377	33,385	33,393	33,400
2470	33,408	33,416	33,424	33,431	33,439	33,447	33,454	33,462	33,470	33,477
2480	33,485	33,492	33,500	33,508	33,515	33,523	33,531	33,538	33,546	33,554
2490	33,561	33,569	33,576	33,584	33,591	33,599	33,606	33,614	33,621	33,629
2500	33,636									

Т а б л и ц а 8.29. Допустимые отклонения показаний термопары ВР 5/20₆₈

Диапазон измеряемых температур, °С		Пределы допускаемых отклонений		Диапазон измеряемых температур, °С		Пределы допускаемых отклонений	
от	до	мВ	°С	от	до	мВ	°С
0	1000	0,080	5,11	0	1500	0,100	7,61
	1100	0,084	5,56		1600	0,104	8,25
	1200	0,088	6,01		1700	0,108	8,93
	1300	0,092	6,51		1800	0,112	9,74
	1400	0,096	7,00				

кой стоимости удается получать монокристаллические мягкие термоэлектроды высокой частоты. Их термоэлектрические характеристики стабильны и дают удовлетворительную повторяемость результатов измерений. Номинальные статические характеристики пока не обобщены и носят частный характер. Термопара применяется для измерений температур до 2800 °С.

Термопары из вольфрама и иридия и их сплавов имеют достаточно высокий и стабильный в широком диапазоне температур удельный коэффициент термоЭДС, равный 26 мкВ/К. Наличие иридия ограничивает верхний предел их применения температурой 2200 °С, а наличие вольфрама требует безокислительной среды.

Термопары неметаллические применяются для измерения высоких температур. Для них характерны высокий удельный коэффициент термоЭДС, химическая стойкость в различных средах, высокая прочность а также возможность расширения диапазона измеряемых температур за 3000 °С. Недостатки связаны, главным образом, с хрупкостью, неизбежно свойственной всем жаростойким материалам.

Наиболее часто для изготовления термоэлектродов используется графит в паре либо с такими металлами, как вольфрам или рений, либо с графитом, легированным бором. Для окислительных сред термоэлектроды изготавливаются из силицидов таких переходных металлов, как молибден, вольфрам, рений. В процессе окислительного нагрева силицидов на поверхности образуется стеклообразная пленка двуокиси кремния, защищающая изделие от дальнейшего окисления и разрушения. Для измерения температур расплавленных сталей и чугунов эффективно используются термоэлектроды из боридов циркония и хрома. При измерении температуры среды, в которой возможны выделения углерода и, следовательно, карбидизация элементов термопары, в качестве термоэлектродов используются карбиды титана, циркония, ниобия, тантала, гафния. В окислительных средах они не стойки.

8.6. Защита термопар

Термопары должны быть обеспечены защитой от вредных веществ, содержащихся во внешней среде. Кроме того, соединенные в одной точке термоэлектроды должны быть электрически изолированы друг от друга. Для обеспечения электрической изоляции и механической прочности обычно используется защитная оболочка; дополнительная механическая прочность и предотвращение химических загрязнений достигаются с помощью защитной трубки. Оболочка и защитная трубка не должны создавать условий для загрязнения термопары.

Таблица 8.30 Свойства керамической изоляции для термопар

Материал	Характер химического соединения	Температура плавления, °C	Огнеупорность, °C	Давление пара при 1730 °C, атм	Температура, °C	Удельное электрическое сопротивление, Ом·см	Поперечное сечение захвата δ	Термостойкость
Al ₂ O ₃	Нейтральный	2050	1950	$5,7 \cdot 10^{-6}$	14 300 800 1000 1100 1300 1500 1970	$1 \cdot 10^{15}$ $3 \cdot 10^{13}$ $3,5 \cdot 10^6$ $9 \cdot 10^7$ $1 \cdot 10^8$ $1 \cdot 10^8$ $3 \cdot 10^4$ $1 \cdot 10^3$	0,010	Хорошая
BeO	Основной	2500 2550 2470	2400	$8,3 \cdot 10^{-6}$	100 600 1000 1100 1300 1600 2000 2100	$8 \cdot 10^{13}$ $4 \cdot 10^9$ $1,6 \cdot 10^8$ $5 \cdot 10^8$ $3 \cdot 10^8$ $3,5 \cdot 10^{10}$ $2 \cdot 10^9$ $8 \cdot 10^8$	0,0007	Отличная
MgO	То же	2800	2400	$7,2 \cdot 10^{-4}$	950 980 1000 1300 1600 2040 2100	$2 \cdot 10^8$ $3 \cdot 10^7$ $9 \cdot 10^{12}$ $6 \cdot 10^8$ $7 \cdot 10^9$ $2,5 \cdot 10^8$ $4,5 \cdot 10^2$	0,0033	Удовлетворительная
ThO ₂	» »	3300	2700	$3,0 \cdot 10^{-6}$	20 500 550 800 1000 1200 1300 1500	$4 \cdot 10^{18}$ $1,2 \cdot 10^{12}$ $2,6 \cdot 10^7$ $8 \cdot 10^8$ $3 \cdot 10^9$ $1,5 \cdot 10^4$ $2 \cdot 10^8$ $7 \cdot 10^2$	0,132	То же
ZrO ₂	Кислотный	2600—2700	2500	$1 \cdot 10^{-6}$	385 750 1200 2000 2050	$1 \cdot 10^8$ $2,2 \cdot 10^8$ $3,6 \cdot 10^2$ 1	0,01	» »
BN	Нейтральный	3000	300 в атмосфере азота или диссоциированно-го аммиака	—	20 350 600 1000 1500 2000	$1 \cdot 10^{17}$ $2 \cdot 10^{18}$ $4 \cdot 10^{11}$ $3 \cdot 10^{10}$ $6 \cdot 10^6$ $1,9 \cdot 10^8$	—	Отличная
HfO ₂	Кислотный	2777	2600	—	400 1500	$5 \cdot 10^9$ $1 \cdot 10^8$	3,05	Хорошая

Химическая стойкость					Сопротивле- ние окисле- нию на воз- духе при T_{max}	Сопротивле- ние восстано- вованию в восстанови- тельной среде при T_{min}	Примечание
Восстано- вительная среда	Углерод	Кислые шлаки	Основные шлаки	Металл			
Хоро- шая	Хоро- шая	Удов- летво- ри- тель- ная	Хоро- шая	Хоро- шая	Очень ве- лико	При темпе- ратуре плавления восстанав- ливается углеродом	В нейтральной атмосфере не ре- агирует при 2000 °С. Не пропу- скает газы до 1900 °С. В водо- роде испаряется при очень высоких температурах
Отлич- ная	Отлич- ная	Хоро- шая	Удов- летво- ри- тель- ная	То же	Окисле- нию не подверга- ется	Диссоци- ирует в присутст- вии водя- ных паров при темпе- ратуре вы- ше 1800 °С.	Химически инерт- на по отношению к молибдену при высоких темпера- турах. Опасна для здоровья
Пло- хая	Пло- хая	Пло- хая	Хоро- шая	Удов- летво- ри- тель- ная	Устойчи- вая в воз- духе при темпера- туре 1700 °С	При 1380 °С восстанав- ливается углерод- содержа- щей атмо- сферой	В контакте с боль- шинством метал- лов менее стойкая чем глинозем. Из- за высокоупругих паров ее нельзя использовать в вакууме при тем- пературах выше 1600 °С
Хоро- шая	Удов- летво- ри- тель- ная	То же	То же	Отлич- ная	Окисле- нию не подверга- ется	При вы- сокой тем- пературе восстанав- ливается углеродом	Из-за радиоактив- ности применение ограничено
То же	То же	Хоро- шая	Плохая	Хоро- шая	То же	Диссоци- ирует в присутст- вии водя- ных паров при тем- пературе выше 1900 °С	Из-за низкого удельного сопро- тивления не реко- мендуется приме- нять в качестве оболочек термопар
» »	» »	Пло- хая	»	То же	Окисля- ется при 700 °С	То же	Упругость пара диссоциации со- ставляет 158 мм рт. ст. при 2050 °С
» »	» »	Хоро- шая	»	» »	Окисле- нию не подверга- ется	—	Может применять- ся для изоляции термоэлектродов до 2000 °С

Существует широкое разнообразие материалов, пригодных для изготовления защитных оболочек термопар. До 100 °С наиболее употребительными являются эмали и лаки, обмотки (шелк, хлопок), пластики и резина. Органические материалы при повышенных температурах разлагаются или становятся электропроводными. Силиконовые лаки могут удовлетворительно использоваться до 300 °С; в этом диапазоне температур чаще применяется стекловолокно. Температура, при которой сопротивление изоляции из стекловолокна становится недостаточным, зависит от типа связующего, но обычно не выше 400 °С. Если в качестве связующего используется силикон, то достигается температура, равная 500 °С.

При изготовлении термопар с минимальными поперечными размерами необходимо получить наименьшую толщину электроизоляционного покрытия термоэлектродов. Основные свойства покрытий — адгезия, термомеханическая совместимость, большое электрическое сопротивление, химическая инертность к материалам термоэлектродов. При изготовлении термопар малых размеров (микротермопар) используют алундовое покрытие, представляющее собой в основном окись алюминия с малыми размерами частиц (1—3 мкм). Органосиликатные материалы защищают материалы термоэлектродов от окисления до температур, не превышающих 1000 °С.

Хорошими свойствами обладают двухслойные (комбинированные) покрытия из алунда и органосиликатного материала. Приближаясь по механическим свойствам к покрытиям из одного органосиликатного материала, двухслойные покрытия имеют лучшие электроизоляционные свойства. С помощью органосиликатных материалов разработана также изоляция термоэлектродных проволок с термостойкой стеклотканью.

При температурах выше 500 °С достаточно высокое электрическое сопротивление и стабильность свойств оболочек могут обеспечить различные керамики, основные термометрические характеристики которых представлены в табл. 8.30. Изоляционные оболочки из плавленного кварца остаются удовлетворительными примерно до 1000 °С и отличаются дополнительным преимуществом — отличной термостойкостью. Однако они очень хрупки и в неокислительных средах создают опасность загрязнения кремнием. В этом интервале температур для изоляции часто используют также различные формы окиси алюминия невысокой чистоты, как, например, фарфор или мулит. Хотя эти материалы устойчивы, они не должны применяться при температурах выше 1000 °С в связи с чрезвычайно высокой опасностью загрязнения. Изготовленные из них изоляционные оболочки имеют вид жестких одноканальных или двухканальных трубок (соломки) или цепочки бус (если необходима гибкость).

Для температур выше 1000 °С защитная оболочка термопар обычно изготавливается из керамики высокой чистоты. В диапазоне от 1000 до 1900 °С почти исключительно применяется непроницаемый корунд (с чистотой выше 99,5 % и с возможно меньшим содержанием примеси железа). Он обладает достаточной термостойкостью и отличной химической стабильностью в различных средах, кроме восстановительных. При температурах выше 1500 °С снижение электрического сопротивления корунда может привести к шунтированию термопары. В этом диапазоне применяется также окись магния, но она уступает корунду почти во всех отношениях. В диапазоне температур 1900...2400 °С рекомендуется окись бериллия. Ее электрическое сопротивление и термостойкость лучше, чем у корунда. Однако окись бериллия токсична и обращаться с ней следует осторожно. Опасность наиболее велика, когда окись бериллия находится в порошкообразном виде. Другие воз-

можные материалы для защитного покрытия термопар — окиси циркония и тория, но ряд недостатков существенно ограничивает их применение.

При температуре выше 2400 °С сохраняют прочность только чистые окиси тория, циркония и гафния, но они становятся электропроводными, что приводит к трудноучитываемым погрешностям. В этих условиях рекомендуются незащищенные термоэлектроды.

Защитные чехлы. Защитным устройством для термопар может быть, в принципе, просто непроницаемая закрытая с концов труба, содержащая соответствующую среду. Оно может иметь форму скважины (канала), в которую вставляется термопара, или являться составной частью узла ПТ. При выборе материала для защитной трубки следует учитывать его совместимость не только с термопарой, но и со средой, в которую он вводится. Помимо окисных керамик для изготовления защитных чехлов применяются металлы: нержавеющая сталь, никель, тантал, платинородиевые сплавы.

8.7. Конструкции и типы ПТ

Для измерения температур в промышленности применяется свыше 300 различных конструктивных типов ПТ. Конструктивное оформление ПТ соответствует условиям их эксплуатации.

Согласно ГОСТ 6616—74, ПТ подразделяются: по назначению и условиям эксплуатации — на погружаемые и поверхностные (и те и другие могут быть стационарными или переносными); по наличию и материалу защитного чехла (трубки) — на изготавливаемые без чехла, со стальным чехлом (до 600 °С), с чехлом из специального жаростойкого сплава (до 1000...1100 °С), с фарфоровым чехлом (до 1300 °С), с чехлом из окиси алюминия (до 1600...1800 °С); по конструкции крепления на месте установки — с неподвижным штуцером и с подвижным фланцем; по защищенности от воздействия внешней среды со стороны выводов — с обыкновенной головкой, с водозащищенной головкой, со специальной заделкой выводных концов (без головки); по защищенности от измеряемой среды — на защищенные от воздействия неагрессивных и агрессивных сред и незащищенные (последние используются в тех случаях, когда внешняя среда не оказывает вредного влияния на термоэлектроды); по герметичности относительно измеряемой среды — на негерметичные и герметичные (для работы при различных условных давлениях и температурах); по устойчивости к механическим воздействиям — вибротряскоустойчивые, ударопрочные и обыкновенные; по числу зон, в которых должна контролироваться температура — на однозонные и многозонные; по материалу термоэлектродов — на выполненные из благородных и неблагородных металлов и сплавов; по инерционности — поскольку значение константы тепловой инерционности зависит не только от конструкции, но и от интенсивности теплообмена между окружающей средой и рабочим концом ПТ, инерционность измеряют, наблюдая за скоростью изменения показаний ПТ, погруженного в жидкую среду. При указанных условиях различают: преобразователи большой инерционности (БИ) — до 3,5 мин; средней инерционности (СИ) — до 1 мин; малоинерционные (МИ) — до 4 с и ненормированной инерционности (НИ).

Согласно ГОСТ 6616—74, предусматривается изготовление ПТ следующих номинальных статических характеристик: ПП₆₈; ПР 30/6₈₈; ХА₆₈; ХК₆₈; ВР 5/20₆₈-1; ВР 5/20₆₈-2; ВР 5/20₆₈-3. Большинство типов ПТ изготавливается в нескольких разновидностях по длине рабочей части в пределах 40—20 000 мм.

Погружаемые термоэлектрические преобразователи предназначены для измерения температуры газообразных и жидких неагрессивных, а также агрессивных сред, не разрушающих защитную арматуру. Конструктивные формы погружаемых ПТ разнообразны, но выполнены на единой конструктивной базе чувствительных элементов и входят в состав средств ГСП (рис. 8.12).

Наружная арматура ПТ состоит из защитной трубы, подвижного или неподвижного штуцера либо фланца крепления термопреобразователя и головки. В головке помещается контактная колодка с зажимами для присоединения проводов, соединяющих ПТ с измерительным прибором. Ввод проводов в головку уплотняется сальником. В ПТ без головки производится заделка выводных концов. Крепление ПТ на объектах осуществляется с помощью штуцера, фланца, специального крепления, сваркой, пайкой и т.п. ПТ выпускаются одинарные и двойные с различной длиной погружения, одно- и многозонные.

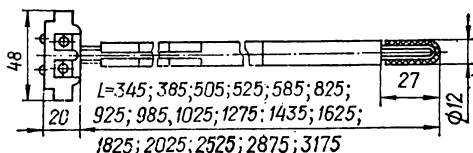


Рис. 8.12. Конструкция и габаритные размеры чувствительных элементов серийных ПТ из неблагородных металлов.

отсутствии головки — до места заделки выводов. При длине погружаемой части более 500 мм и установке ПТ в горизонтальном или наклонном положении предусматривается дополнительное крепление. При измерении температуры сред с высоким давлением и большой скоростью потока ПТ комплектуются защитными (монтажными) гильзами.

Основные технические характеристики ПТ погружения приведены в табл. 8.31, конструктивное выполнение и их габаритные размеры — на рис. 8.13.

Термоэлектрические преобразователи для измерения температуры поверхности предназначены для измерения температуры поверхностей в различных условиях (стационарные, переносные и для измерения температуры вращающихся поверхностей). Выпускаются в обыкновенном и тропическом исполнении, герметичные и негерметичные, с водозащищенной головкой или без головки, обыкновенные или виброустойчивые. Термоэлектроды изготавливаются из хромелевой, копельевой, алюмелевой проволоки, защитная арматура — из сталей ОХ13; 18Н10Т; СТ-20. Некоторые термопреобразователи не имеют защитной арматуры. Основные технические характеристики ПТ этой группы приведены в табл. 8.32, конструктивные исполнения и их габаритные размеры — на рис. 8.14.

Термопреобразователи для измерения температуры расплавленных металлов. Для измерения температуры расплавленных металлов широкое распространение получили ПТ, изготовленные из термоэлектродов тугоплавких и благородных металлов. Большое значение при этом имеет конструкция преобразователя и материал защитной арматуры. В связи с отсутствием материалов, длительно работающих в расплавленных металлах, используют специальные конструкции для кратковременного измерения погружением защищенного рабочего

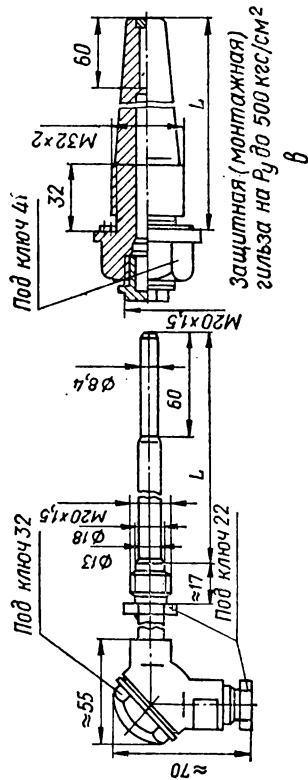
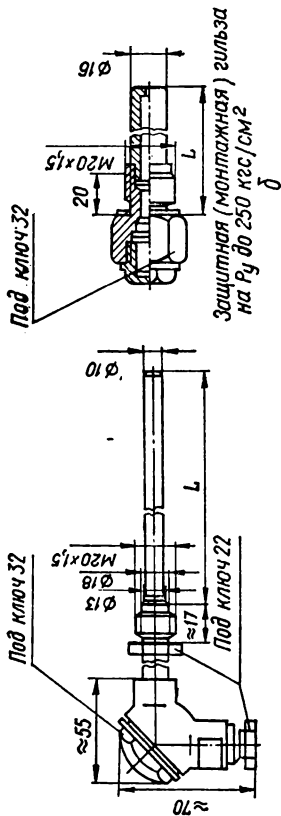
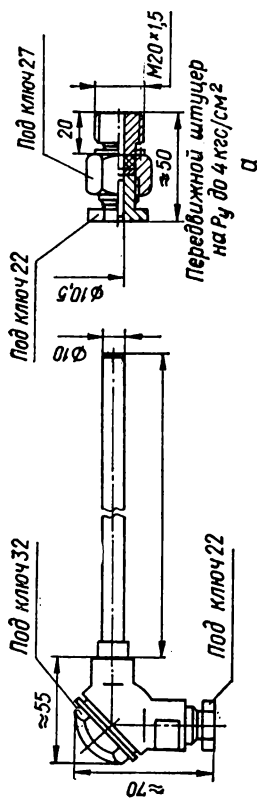


Рис. 8.13. ПТ погружения:
 а — с подвижным штуцером; б — с защитной гильзой на условное давление измеряемой среды до 25,0 МПа; в — с защитной гильзой на условное давление измеряемой среды до 50,0 МПа.

Т а б л и ц а 8.31. Характеристики термоэлектрических преобразователей

Тип	Среда (объект) измерения	Диапазон измеряемых температур		Погрешность, мВ
		от	до	
ТХА-151	Жидкая, газообразная	—50	1000	$\pm 0,3$
ТХК-151		—50	600	$\pm 0,38$
ТХА-0515		—50	900	—
ТХК-0515		—200	+900	—
ТХК-0806		—1000		$\pm 0,3$
ТХК-0806		0	—600	$\pm 0,38$
ТХА-1489		0	—1000	$\pm 0,3$
ТХК-1489		0	—600	$\pm 0,38$
ТПП-0555		0	—1300	$\pm 0,03$
ТПР-0555		300	—1600	$\pm 0,053$
ТХА-0907		0	—600	$\pm 0,22$
ТХК-0907				$\pm 0,38$
ТХК-1319		0	—300	$\pm 0,2$
ТХК-1368	Газовые потоки	0	—1000	$\pm 0,3$
ТПП-1378	Газовая окислительная	—20	1300	$\pm 0,035$
ТПР-1378		300	1600	$\pm 0,0529$
ТПР-0213		300	1600	$\pm 0,052$
ТХК-539М	Водород, угарный газ, пары воды и высшие углеводороды			
ТХК-529	Корпуса и головки червячных прессов	0	400	$\pm 0,26$
ТХК-582				$\pm 0,26$
ТХК-0083	Головки прядильных машин и нагревательного утюга машин горячей вытяжки	0	300	$\pm 0,2$
ТХК-0274	Емкости и трубопроводы	0	520	$\pm 0,33$
ТХК-0445	Реакторные установки каталитического риформинга, гидроочистка нефтепродуктов	0		
ТХК-0455	Камера смешения резиносителя	60	—200	$\pm 0,2$
ТВР-0573	Горячее дутье доменных печей и купола воздухонагревателя	0	1700	$\pm 0,28$
ТПР-0573		300	1600	$\pm 0,53$
ТПР-1273	Насадка воздухонагревателя	300	1300	$\pm 0,34$
ТХК-003	Пищевые изделия	0	150	$\pm 0,2$

погружения, выпускаемых промышленностью СССР серийно

Инерционность, с. не более	Условное давление, кгс/см ²	Устойчивость к механическим воздействиям	Длина по- гружаемой части, мм
Не нормирована	Негерметичен	Обыкновенная	340 ... 3222
10; 20; 40	4; 64	Виброустойчив	120 ... 2000
210	40; 2,5		160 ... 3200
Не нормирована	—		1000... 20000
40	Негерметичен	Обыкновенная	320 ... 2000
60	Герметичен		До 2500
210	1,6		До 4000
24	Герметичен	Виброударопрочен	80 ... 100
—	Негерметичен	Обыкновенная	40 ... 10000
60	35	»	400 ... 1600
5	Негерметичен	Виброустойчив	10 ... 320
5	»	»	500 ... 1000
5	»	»	500 ... 1000
25	200	»	50 ... 320
Не нормирована	Негерметичен	Обыкновенная	2800 ... 9000
13	40		До 250
210	10	Вибротряскоус- тойчив	1270 ... 2070
60	10		1250 ... 4000
3	6	Обыкновенная	60 ... 100

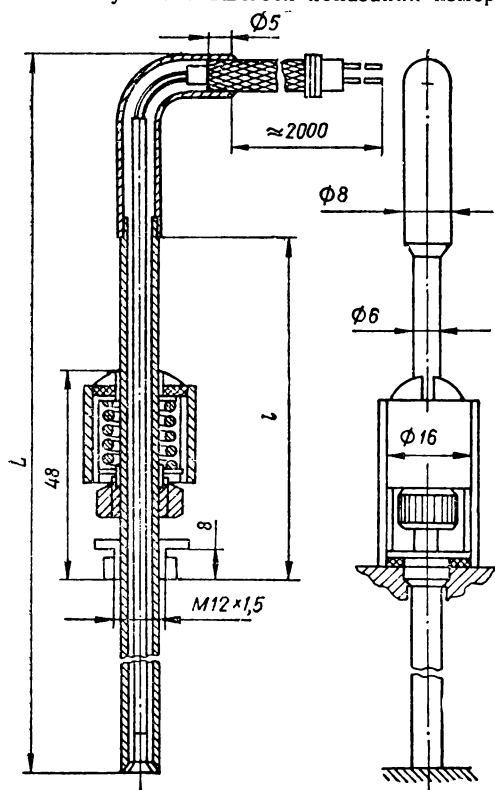
Таблица 8.32. Термоэлектрические преобразователи для измерения температуры поверхности

Тип	Диапазон измеряемых температур, °С		Погрешность, мВ, не более	Инерционность, с	Устойчивость к механическим воздействиям	Длина монтажной части, мм
	от	до				
ГХА-1479	0	750	±0,25	60	Обыкновенная Не герметичен	100 ... 630
ГХК-1479	0	600	±0,38	Не нормирована		500 ... 15 000
ГХКШ-541						
ГХК-834	0	400	±0,26	5	Вибротростойчив	100 ... 320
ГХК-382						

конца преобразователя в ванну с металлом на глубину 70...100 мм, отсчет установившегося показания измерительного прибора и извлечением преобразователя из ванны. Малая инерционность преобразователя при такой последовательности измерительного процесса приводит к тому, что длительность пребывания ПТ в жидком металле составляет 5...7 с. Поэтому агрессивное воздействие жидкого металла на материал защитного колпачка сводится к минимуму.

Основные технические характеристики ПТ, серийно выпускаемых промышленностью СССР для измерений температуры расплавленного металла, представлены в табл. 8.33. Все указанные в ней приборы поставляются в негерметичном исполнении и с обыкновенной устойчивостью к механическим воздействиям.

Рис. 8.14. ПТ с прижимной пружиной для измерения температуры поверхности.



Для контроля температуры в сталеплавильных агрегатах применяются термометры, в состав которых входит автоматический потенциометр, фиксирующий температуру на диаграммной ленте, и первичный ПТ, состоящий из корпуса и сменного бумажного пакета одно-разового действия, включающего кварцевую защитную трубку с термопарой из термоэлектродов диаметром 0,08—0,12 мм. При измерении такими термометрами (рис. 8.15) в жидкую сталь, покрытую шлаком, погружают сменный пакет ПТ. Сигнал от термопары подается по кабелю на самопишущий потенциометр. Управляющее сигнальное устройство посредством светофора сообщает о состоянии цепи и готовности к измерению (зеленый сигнал). В процессе измерения, которое про-

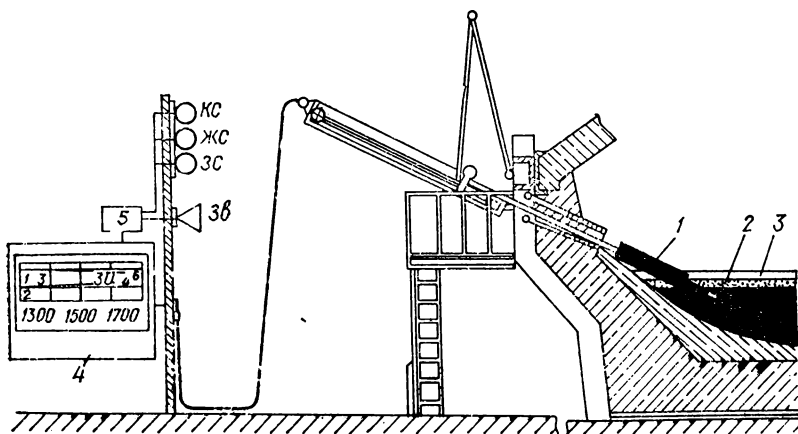


Рис. 8.15. Принципиальная схема измерения температуры жидкого металла термометром со сменным пакетом ПТ:

1 — сменный пакет; 2 — жидкая сталь; 3 — шлак; 4 — самопишущий потенциометр; 5 — сигнальное устройство.

должается 5...7 с, горит желтый сигнал; о том, что измерение окончено и пакет пора извлекать из расплава, сигнализирует красный свет или звонок.

Термоэлектрические платинородиевые ТПР-2075 и вольфрамомолибденовые ТВР-2075 преобразователи рассчитаны на измерения в диапазоне температур от 1300 до 1800 °С, выдерживают погружение в жидкий металл в течение 5 с; вероятность безотказной работы за это время составляет 0,92. Рабочий конец термопары защищен кварцевым колпачком; длина бумажной гильзы 1000 мм, внутренний диаметр 20 мм. Корпус ПТ рассчитан на число измерений, не превышающее 1500.

ПТ выполняются в трех модификациях: К — для измерения температуры в конвертере; С — в сталеразливочном ковше; У — в промежуточном ковше. Модификация К и С соответствует изогнутой арматуре корпуса с дополнительной теплозащитной бумажной гильзой, а модификации У — прямая арматура:

Модификация	К	С	У
Длина, мм	6000	4000	4500
Масса, кг	13,5	12,0	12,0

Т а б л и ц а 8.33. Термoeлектрические преобразователи для измерения температуры жидких металлов, серийно-выпускаемые промышленностью СССР

Тип	Среда (объект) измерения	Диапазон измере- мых температур, °С		Погреш- ность, мВ	Инерцион- ность, с	Длина погружае- мой части, мм
		от	до			
ТПР-0475	Расплав меди в конверторах и газ под сводом отражательной печи	300	1500	$\pm 0,041$	3	800
ТПР-0495	Шлак и штейн в отражательных печах	300	1250	$\pm 0,041$	3	4715
ТПР-1408	Расплавленная сталь в электропечах	1300	1700	$\pm 0,046$		
ТПР-1408М	Расплавленная сталь в мартенов- ских печах	1300	1700	$\pm 0,046$	5	60 ... 160
ТПР-1418М	Расплавленная сталь	1300	1700	$\pm 0,046$		
ТПР-2075	Фундамент доменной печи	1500	1800	$\pm 1 \%$		500
ТХА-1007	Расплавленный цинк в цинковых ваннах	0	600	$\pm 0,022$	40	3500 ... 10000
ТХА-1358	Водородная электропечь	0	500	$\pm 0,2$	3,5	800 ... 1600
ТВР-251	Высокотемпературная печь	100	1800	$\pm 0,5 \%$	40	100 ... 300
ТВР-299	Очищенный от шлака расплавлен- ный чугун	800	1950	$\pm 0,5 \%$	Не норми- рована	240 ... 380
ТВР-301-01-С	Водородная электропечь	1200	1550	$\pm 0,088$	3	32
ТВР-0877	Расплавленная сталь	300	1800	$\pm 1 \%$	10	56 ... 900
ТВР-1338		300	1800	$\pm 1 \%$	3	56 ... 900
ТВР-2075		1500	1800	$\pm 1 \%$	2	500

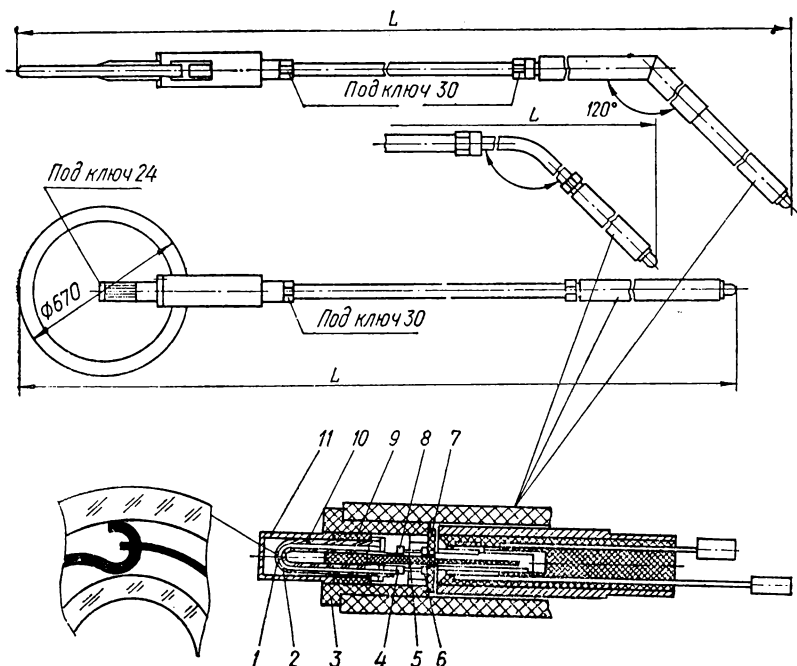


Рис. 8.16. ТТ для измерения температуры жидкого металла с вынесенным пакетом и конструктивным оформлением рабочего спая:

1 — рабочий спай; 2 — U-образная защитная трубка; 3 — втулка из керамики; 4, 8 — нерабочие спай; 5 — колодка-держатель; 6, 7 — удлинительные провода; 9 — огнеупорная масса; 10 — термопара; 11 — металлический колпачек.

Корпуса ТТ поставляются в разобранном виде. В состав корпуса входят следующие узлы: труба, наконечник, ручка, контактодержатель, кабель, набор бумажных гильз, заклепки и разъемы. Наконечник, соединенный с контактодержателем при помощи заклепки, служит посадочным местом для пакета. Непроизвольное отсоединение пакета от корпуса предотвращается силой трения между наконечником и бумажной гильзой пакета, а также силой трения между контактами контактодержателя и измерительной головки пакета.

Контактодержатель состоит из патрубка, внутри которого один под другим установлены два контакта (кольца с припаянными к ним выводами). Для преобразователей ТПР применяются медные выводы, для ТВР — выводы из меди и медно-никелевого сплава (2,4 % Ni). Внутренняя полость патрубка заполнена компаундом. Для соблюдения правильной полярности положительный контактодержатель (меньшей длины) промаркирован красной краской. Контактодержатель рассчитан примерно на 150 измерений. В комплект запасных частей преобразователя входят девять контактодержателей.

Для преобразователей ТПР применяется серийный кабель типа КМЖ с керамической засыпкой токоведущих медных проводников в медной трубке, для ТВР — кабель с токоведущими проводниками

из меди и медно-никелевого (2,4 % Ni) сплава, изолированных друг от друга двухканальными изоляторами из окиси алюминия. Проводники вместе с изоляторами помещаются в стальную трубку и герметизируются с двух сторон компаундом. Полярность проводников маркируется по полихлорвиниловой трубке (положительный отмечен красной краской).

Пакеты ПТПР и ПТВР поставляются отдельно в количествах, необходимых для температурного контроля процесса производства стали. В комплект запасных частей каждого преобразователя входят 29 пакетов. Пакет представляет собой гильзу из бумаги (толщина стенки 6,5 мм), в которую на специальной шпатлевке впрессовывается измерительная головка, качество изготовления которой во многом определяет метрологические характеристики термопреобразователей. Конструкции ПТ представлены на рис. 8.16.

8.8. Проверка и определение номинальных статических характеристик термопар и ПТ

Существует два основных метода определения номинальных статических характеристик термопар: метод сличения и по постоянным точкам (в основном по точкам затвердевания чистых металлов).

Метод определения номинальных статических характеристик по постоянным точкам основан на использовании свойств металлов (как и вообще веществ) поглощать или выделять тепло при переходе из одного фазового состояния в другое. От начала и до конца фазового перехода температура металла (вещества) остается постоянной — характерной только для данного металла (вещества). Реализация метода может производиться как по температуре затвердевания, так и по температуре плавления металлов. Однако воспроизводимость определения номинальных статических характеристик по температуре плавления хуже, чем по температуре затвердевания.

Определение номинальных статических характеристик термопар указанным методом обеспечивает среднеквадратичную погрешность не более 0,1; 0,2 и 0,3 К соответственно при температурах затвердевания цинка, сурьмы и меди. Этот метод является наиболее точным из всех известных в настоящее время.

Разновидностью метода определения номинальных статических характеристик по постоянным точкам является метод плавления проволоки: на рабочий конец термопары, спай которой изготовлен путем скрутки или сварки ее термоэлектродов, навивается несколько витков проволоки из металла с известной температурой плавления. Термопару армируют двухканальной трубкой из огнеупорного материала, оставляя участок термоэлектродов длиной 10...15 мм между рабочим концом термопары и защитной трубкой оголенным. В качестве нагревательной установки служит печь с цилиндрическим рабочим пространством и нагревателем, позволяющим получать требуемую температуру. В рабочее пространство печи помещается термопара, по которой устанавливается в рабочем пространстве температура примерно на 10...15 К ниже температуры плавления проволоки, навитой на рабочий конец термопары. Затем медленно поднимают температуру в печи и производят отсчеты термоЭДС термопары с интервалами в 10...15 с до момента, пока термоЭДС термопары практически не перестанет изменяться. Измеренной термоЭДС в момент стабилизации ее значения приписывают температуру плавления проволоки. После определения характеристик термопары участок термоэлектродов длиной 10...15 мм от рабочего конца следует удалить.

При использовании указанного метода не следует применять плавящуюся проволоку из металлов, образующих с термоэлектродами термопары эвтектическое соединение, так как это может привести не только к искажению результатов измерения, но и вызвать разрушение термоэлектродов термопары в местах их контакта с плавящейся проволокой.

Определение номинальных статических характеристик термопар сличением — наиболее распространенный метод в производственной практике. Он заключается в сопоставлении показаний исследуемой термопары с образцовой термопарой или другим образцовым прибором, например пирометром, при различных температурах ее рабочего конца и фиксированной температуре свободных концов. Температура свободных концов, как правило, поддерживается равной 0 °С.

Метод сличения несколько менее точен, чем метод постоянных точек, но зато более прост в осуществлении и доступен для применения в заводской практике. Его обычно применяют для определения номинальной статической характеристики образцовых термопар II разряда, термопар повышенной точности, а также для технических термопар.

Номинальную статическую характеристику термопар в диапазоне температур от -40 до 1800 °С определяют на установках УТТ-6 (УТТ-6А — от -40 до 1800 °С; УТТ-6Б — от -40 до 1200 °С; УТТ-6В — от -40 до 1200 °С) с нагревательной печью типа ПГНТ-1. Максимальная среднеквадратичная погрешность поверки при максимальной температуре ± 5 К, при минимальной — $\pm 0,03$ К. Установка обеспечивает одновременную поверку шестнадцати термопар, поверяемых по двум образцовым термопарам. Диаметр поверяемых термопар от 5 до 24 мм.

Для обеспечения хорошего теплового контакта между рабочими спаями поверяемой и образцовой термопар горячие спай помещают в отверстия, высверленные в торце цилиндрического никелевого блока. Для предохранения от загрязнений рабочий участок образцовой термопары защищают тонкостенными колпачками из жаростойких материалов. Во избежание возникновения градиента температур по длине блока последний устанавливают в рабочем пространстве печи в зоне равномерного поля максимальной температуры. После установки термопар в градуировочную печь отверстия ее плотно закрывают.

Номинальную статическую характеристику термопар в диапазоне температур от 1800 до 3000 °С определяют согласно методике МИ-85—76. Методика устанавливает способы и средства индивидуальной аттестации бухт термоэлектродной проволоки путем плавления малых количеств металлов или окислов на рабочем спае термопары или поэлектродным сличением со стандартным образцом (СОТМ) I и II разрядов. Нагревательные устройства УГТ-2500 и ПЭЛ-3000 обеспечивают нагрев до температуры 2500...3000 °С в вакууме и аргоне.

При использовании метода поэлектродного сличения со стандартным образцом (СОТМ) одновременно градуируют образцы от начала, середины и конца бухты. Температура в печи в процессе измерения термоЭДС не должна увеличиваться более чем на 0,05 К в 1 с. Номинальные статические характеристики следует определять через каждые 100 К (шаг может быть увеличен или уменьшен в зависимости от необходимости). Отклонения температуры от значений, кратных 100 К, должны составлять не более 20 К. Погрешность рабочих средств измерения температуры составляет ± 12 К при максимальной температуре.

9.1. Тепловое излучение

Термометрические средства, основанные на тепловом излучении тел, называются пирометрами излучения или просто пирометрами. При температуре, отличной от абсолютного нуля, всякая поверхность испускает электромагнитное излучение. Тепловое излучение — это электромагнитное излучение с длиной волны в диапазоне от 0,1 до 1000 мкм. Внутри этого диапазона находится область видимого излучения (от 0,4 до 0,8 мкм).

Теория теплового излучения базируется на электромагнитной теории Максвелла, позволяющей с использованием законов термодинамики и экспериментальных определений скорости распространения света найти все остальные физические характеристики:

Скорость света в вакууме $c = 299\,792\,458$ м/с

Постоянная Планка $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$ Дж/с

Постоянная Больцмана $k = 1,380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К

Первая постоянная излучения $C_1 = 3,741832 \cdot 10^{-16}$ Вт · м²

Вторая постоянная излучения $C_2 = 1,438786 \cdot 10^{-2}$ м · К

Постоянная Стефана—Больцмана $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴)

Термины, обозначения и определения, используемые в теории теплового излучения, приведены в табл. 9.1 (ГОСТ 7601—78, 13417—76).

В пирометрах излучения широко применяются стекла, зеркала, поглощающие тела. Для всех случаев — как для монохроматического, так и для полного потока излучения — справедливы аналогичные соотношения:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1, \quad \alpha + \rho + \tau = 1.$$

Для нормального отражения от поверхности стекла справедлива формула Френеля:

$$\rho = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2,$$

действительная как для входа, так и для выхода луча из стеклянного массива.

9.2. Физические законы излучения

Закон Кирхгофа, в силу универсальности («для всех тел»), применим и к абсолютно черному телу, для которого излучательная и поглощательная способности, а значит, и их отношение $\frac{\alpha}{\rho}$ тождественно

Таблица 9.1. Термины, обозначения и определения основных величин пирометрии излучения

Термин	Обозначение	Определение
Амплитуда колебаний	A	Наибольшее абсолютное значение величины, изменяющейся по закону гармонического колебания. Допускается обозначать амплитуды колебаний буквой, представляющей соответствующую величину, с подстрочным индексом m : например, амплитуда напряженности электрического поля излучения
Длина волны	λ	Расстояние, на которое смещается поверхность равной фазы волны за один период колебаний
Интенсивность излучения	I	Величина, пропорциональная квадрату амплитуды электромагнитного колебания
Энергия излучения	$Q_e [W]$	Энергия, переносимая излучением. В физической оптике под излучением понимается оптическое излучение, представляющее собой электромагнитное излучение с длинами волн в диапазоне примерно от 1 нм до 1 мм. Светом следует называть только видимое излучение в диапазоне от 380...400 до 760...780 нм. Для обозначения оптических величин используется индекс e , для световых величин — индекс v . Индексы опускаются, когда исключена возможность различного толкования указанных величин
Скорость электромагнитного излучения в вакууме; скорость света в вакууме	c	Скорость переноса энергии излучения в вакууме
Постоянная Планка	h	Квант действия, равный отношению энергии кванта излучения к частоте соответствующего ему монохроматического излучения. Допускается применение постоянной $\hbar = h/2\pi$
Вектор Пойнтинга	S	Величина, направление которой совпадает с направлением распространения энергии излучения, а абсолютное значение равно отношению мощности излучения, проходящего сквозь перпендикулярную направлению вектора поверхность, к площади этой поверхности

Термин	Обозначение	Определение
Поток излучения	$\Phi_e [P]$	Отношение энергии, переносимой излучением, ко времени переноса, значительно превышающему период колебания
Сила излучения	I_e	Отношение потока излучения, распространяющегося от источника в рассматриваемом направлении внутри малого телесного угла, к этому телесному углу
Энергетическая освещенность; облученность	E_e	Отношение потока излучения, падающего на рассматриваемый малый участок поверхности, к площади этого участка
Энергетическая светимость; излучательность	M_e	Отношение потока излучения, исходящего от рассматриваемого малого участка поверхности, к площади этого участка
Энергетическая яркость	L_e	Отношение потока излучения, распространяющегося в рассматриваемом направлении внутри малого телесного угла $d\omega$ через участок поверхности dA , к произведению этого телесного угла, площади участка и косинуса угла θ между рассматриваемым направлением и нормалью к участку dA : $L_e = \frac{d^2\Phi_e}{d\omega dA \cos \theta} = \frac{dI_e}{dA \cos \theta} = \frac{dE_e}{d\omega \cos \theta}$
Спектральная плотность энергетической светимости черного тела; спектральная плотность излучательности черного тела	$M_{e,\lambda}^0$	Величина, определяемая законом Планка: $M_{e,\lambda}^0 = c_1 \lambda^{-5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1},$ где $c_1 = 2\pi^5 h^6 c^2 / 15$; $c_2 = hc/k$
Световой поток	Φ_v	Величина, пропорциональная потоку излучения, оцененному с учетом относительной спектральной световой эффективности монохроматического излучения. Световой поток определяется выражением $\Phi_v = K_m \int V(\lambda) \Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda,$ где $K_m \approx 680$ лм/Вт; $V(\lambda)$ — относительная спектральная световая эффективность монохроматического излучения; $\Phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda$ — поток излучения в спектральном интервале $\lambda, \lambda + d\lambda$

Термин	Обозначение	Определение
Световая энергия	Q_v	Произведение светового потока на длительность освещения
Сила света	I_v	Отношение светового потока, распространяющегося от источника в рассматриваемом направлении внутри малого телесного угла, к этому телесному углу
Освещенность	E_v	Отношение светового потока, падающего на рассматриваемый малый участок поверхности, к площади этого участка
Светимость	M_v	Отношение светового потока, распространяющегося от рассматриваемого малого участка поверхности, к площади этого участка
Яркость	L_v	Отношение светового потока, распространяющегося в рассматриваемом направлении внутри малого телесного угла $d\omega$ через участок поверхности dA , к произведению этого телесного угла, площади участка и косинуса угла θ между рассматриваемым направлением и нормалью к участку dA : $L_v = \frac{d^2\Phi_v}{d\omega dA \cos \theta} = \frac{dI_v}{dA \cos \theta} = \frac{dE_v}{d\omega \cos \theta}$
Коэффициент пропускания	$\tau [T]$	Отношение потока излучения, прошедшего сквозь тело, к потоку излучения, упавшему на него (для неинвертированных систем $\Delta N > 0$).
	-	Для коэффициентов пропускания, отражения и поглощения справедливо соотношение $\tau + \rho + \alpha = 1$. В определениях оптических характеристик веществ и тел вместо оптических величин могут применяться световые величины
Коэффициент отражения	$\rho [R]$	Отношение потока излучения, отраженного данным телом, к потоку излучения, упавшему на него (для неинвертированных систем $\Delta N > 0$)
Коэффициент поглощения	$\alpha [A]$	Отношение потока излучения, поглощенного данным телом, к потоку излучения, упавшему на него (для неинвертированных систем $\Delta N > 0$)

Термин	Обозначение	Определение
Показатель преломления	n	Отношение скорости электромагнитного излучения в вакууме к фазовой скорости излучения в данной среде
Показатель рассеяния	r	Величина, обратная расстоянию, на котором поток излучения, образующего параллельный пучок, ослабляется в 10 раз в результате рассеяния в веществе
Коэффициент теплового излучения	ε	Отношение энергетической светимости (излучательности) теплового излучателя к энергетической светимости (излучательности) черного тела при той же температуре
Коэффициент направленного теплового излучения	$\varepsilon(\Theta, \varphi)$	Отношение энергетической яркости теплового излучателя в данном направлении к энергетической яркости черного тела при той же температуре
Радиационная температура	$T_M [T_R]$	Температура черного тела, при которой его энергетическая светимость (излучательность) равна энергетической светимости (излучательности) рассматриваемого теплового излучателя
Яркостная температура	$T_L [T_S]$	Температура черного тела, при которой для данной длины волны (частоты, волнового числа) оно имеет ту же спектральную плотность энергетической яркости, что и рассматриваемый тепловой излучатель. В визуальной пирометрии в качестве данной используют длину волны 655 нм
Цветовая температура	T_c	Температура черного тела, при которой его излучение имеет ту же цветность, что и рассматриваемое излучение (цветность по ГОСТ 13088—67)

равны единице. Поэтому закон Кирхгофа можно сформулировать следующим образом: при одинаковых длинах волн и одинаковых температурах у всех тел коэффициенты излучения равны коэффициентам поглощения $\varepsilon_{\lambda T} = \alpha_{\lambda T}$.

Коэффициент полного теплового излучения ε_T равен отношению излучательной способности данного излучателя к излучательной способности абсолютно черного тела при той же температуре. Аналогичные отношения справедливы и для монохроматического излучения ε_λ .

Таблица 9.2. Интегральная излучательная способность различных материалов

Материал	Температура, °C	ϵ_T
Чистые и окисленные металлы		
Алюминий		
полированный	50 ... 100	0,04 ... 0,06
с шероховатой поверхностью	20 ... 50	0,06 ... 0,07
сильно окисленный	50 .. 500	0,2 ... 0,3
Алюминиевый лак на шероховатой поверхности	20	0,4
Алюминиевые краски разного возраста	50 ... 100	0,27 ... 0,67
Алюминиевая бронза	20	0,6
Алюминий сернистый в порошке	—	0,54
Алюминия гидрат окиси в порошке	—	0,28
Алюминия окись чистая в порошке (глинозем)	—	0,16
Алюминиевая окись, активированная в порошке	—	0,46
Аммоний хлористый в порошке	—	0,66
Аммоний урановокислый в порошке	—	0,40
Барий хлористый в порошке	—	0,65
Бария сульфид желтый в порошке	—	0,45 ... 0,54
Бериллий сернистый в порошке	—	0,85
Бронза полированная	50	0,1
Бронза пористая, шероховатая	50 ... 150	0,55
Бронза в порошке	—	0,76 ... 0,80
Вольфрам	200	0,05
»	600 ... 1000	0,1 ... 0,16
»	1500 ... 2200	0,24 ... 0,31
Вольфрамовая нить	3300	0,39
Вольфрамовая окись в порошке	—	0,80
Висмут		
полированный	80	0,37
трихлористый	—	0,68
Железо электролитическое, тщательно полированное	175 ... 225	0,05 ... 0,06
сварочное, тщательно полированное	40 ... 250	0,28
полированное	400 ... 1000	0,14 ... 0,38
блестящее, травленное	150	0,16
свежеобработанное наждаком	20	0,24
литое, необработанное	900 ... 110	0,87 ... 0,95
окисленное	100	0,74
То же	125 ... 525	0,78 ... 0,82
Железо		
покрытое красной ржавчиной	20	0,61 ... 0,85
горячекатаное	20	0,77
То же	130	0,60
Железо		
сернистое, в порошке	—	0,60
листовое, оцинкованное, блестящее	30	0,23
листовое, оцинкованное, окисленное	20	0,28

Продолжение табл. 9.2

Материал	Температура, °С	ϵ_T
Жесть белая, старая	20	0,28
Золото		
тщательно полированное	200 ... 600	0,02 ... 0,03
полированное	130	0,018
Калий		
азотнокислый в порошке	—	0,58
углекислый в порошке	—	0,40
»	—	0,30
Латунь полированная	200	0,03
Латунь		
матовая, тусклая	20 ... 350	0,22
листовая, прокатанная	20	0,06
листовая, обработанная наждаком	20	0,2
окисленная при 600° С	200 ... 600	0,59 ... 0,61
Литый углекислый в порошке	—	0,16
Медь		
электролитическая, тщательно полиро-	80	0,018
ванная	50 ... 100	0,02
полированная	20	0,07
торговая, шабренная до блеска	50	0,6 ... 0,7
окисленная	5	0,88
окисленная до черноты	1100 ... 1300	0,13 ... 0,15
расплавленная	—	0,76
электролитическая в порошке	—	0,60
Меди двуокись в порошке	—	0,70
Меди окись красная в порошке	—	0,84
Медь	—	0,92
уксуснокислая в порошке	600 ... 1000	0,08 ... 0,13
сернокислая в порошке	1500 ... 2200	0,19 ... 0,26
Молибден	700 ... 2500	0,1 ... 0,3
»	120	0,05
Молибденовая нить	—	0,86
Манганин блестящий, прокатанный	—	0,44
Магний в порошке	100	0,045
Марганец углекислый в порошке	200 ... 400	0,07 ... 0,09
Никель	200 ... 600	0,37 ... 0,48
технически чистый, полированный	200 ... 600	0,52 ... 0,59
технически чистый, полированный	500 ... 650	0,75 ... 0,86
окисленный при 600° С	1000 ... 1250	0,1 ... 0,2
Никеля окись	200 ... 1000	0,05
»	50	0,11 ... 0,40
Никелевая проволока	20	0,78
Никель, нанесенный на чугунную поверх-	—	0,92
ность	—	
Никелированное железо неполированное	—	
Никель в порошке	—	
Никеля окись кристаллическая в порошке	—	
Натрий	—	
углекислый в порошке	—	0,40 ... 0,80
азотнокислый в порошке	—	0,36

Продолжение табл. 9.2

Материал	Температура, °C	ε _γ
Нихром		
после прокатки	700	0,25
после пескоструйной обработки	700	0,70
Нихромовая проволока чистая	50	0,65
» »	500 ... 100	0,71 ... 0,79
Нихромовая проволока окисленная	50 ... 500	0,95 ... 0,98
Олово блестящее	20 ... 50	0,04 ... 0,06
Олова двуокись в порошке	—	0,40
Платина чистая, полированная	200 ... 600	0,05 ... 0,10
Платина	1000 ... 1500	0,14 ... 0,18
Платиновая проволока	50 ... 200	0,06 ... 0,07
» »	500 ... 1000	0,1 ... 0,16
» »	1400	0,18
Платиновая лента	900 ... 1100	0,12 ... 0,17
Ртуть чистая	0 ... 100	0,09 ... 0,12
Рубидий хлористый в порошке	—	0,36
Серебро чистое, полированное	200 ... 600	0,02 ... 0,03
Свинец блестящий	250	0,08
Свинец		
серый, окисленный	20	0,28
окисленный при 200 °C	200	0,63
сернистый в порошке	—	0,13 ... 0,22
Свинца окись желтая в порошке	—	0,29
Свинец уксуснокислый в порошке	—	0,70
Свинцовый сурик в порошке	100	0,93
Сурьма в порошке	—	0,82
Стронция гидрат окиси в порошке	—	0,16
Стронций хлористый	—	0,73
Сталь		
мягкая, расплавленная	1600 ... 1800	0,28
листовая, шлифованная	950 ... 1100	0,55 ... 0,61
листовая, полированная	750 ... 1050	0,52 ... 0,56
листовая, прокатная	50	0,56
листовая, с блестящим слоем окиси	20	0,82
с шероховатой плоской поверхностью	50	0,95 ... 0,98
ржавая, красная	20	0,69
окисленная	200 ... 600	0,80
сильно окисленная	50	0,88
» »	500	0,98
алитированная	50 ... 500	0,79
никелированная листовая	20	0,11
свежепрокатанная	20	0,24
оцинкованная	20	0,28
легированная (8 % Ni, 18 % Cr)	500	0,35
нержавеющая, после прокатки	700	0,45
нержавеющая, после пескоструйки	700	0,70
Титан полированный	200	0,15
» »	500	0,20
» »	1000	0,36

Продолжение табл. 9.2

Материал	Температура, °C	ϵ_T
Титан, окисленный при 540 °C	200	0,40
» » » »	500	0,50
» » » »	1000	0,60
Титана двуокись в порошке	—	0,20
Таллий углекислый в порошке	—	0,32
Торий азотнокислый в порошке	—	0,56
Тория окись в порошке	—	0,15
Хром полированный	50	0,10
» »	500 ... 1000	0,28 ... 0,38
Цезий хлористый	—	0,48
Цинк		
полированный	200—300	0,04 ... 0,05
листовой	50	0,20
окисленный при 400 °C	400	0,11
с окисленной поверхностью	1000 ... 1200	0,50 ... 0,60
в порошке	—	0,82
азотнокислый в порошке	—	0,73
углекислый в порошке	—	0,24
Циркония окись в порошке	—	0,16 ... 0,20
Циркония силикат в порошке	—	0,36 ... 0,42
Чугун		
полированный	200	0,21
обточенный	800 ... 1000	0,60 ... 0,70
окисленный при 600 °C	200 ... 600	0,64 ... 0,78
Чугунное литье	50	0,81
Чугун в болванках	1000	0,95
Чугун жидкий	1300	0,28

Термоизолирующие, строительные, огнеупорные
и другие материалы

Асбест в порошке	—	0,40 ... 0,60
Асбестовый картон	20	0,96
Асбестовая бумага	40—400	0,93 ... 0,95
Асбошифер	20	0,96
Бумага		
белая	20	0,7 ... 0,9
желтая	—	0,72
красная	—	0,76
зеленая	—	0,85
синяя	—	0,84
черная	—	0,90
покрытая черным лаком	—	0,93
черная матовая	—	0,94
Вода (слой толщиной более 0,1 мм)	0—100	0,95 ... 0,98
Водяная пленка на металлической поверхности		
Гипс	20	0,98
Глина обожженная	70	0,91
Графит в порошке	—	0,97

Продолжение табл. 9.2

Материал	Температура, °C	ϵ_T
Дерево		
белое, сырое	20	0,7 ... 0,8
строганое	20	0,8 ... 0,9
шлифованное	—	0,5 ... 0,7
Древесный уголь в порошке	—	0,96
Известь	—	0,3 ... 0,4
Каолин в порошке	—	0,30
Кварц плавленный шероховатый	20	0,93
Кизельгур в порошке	—	0,25
Кирпич		
огнеупорный, слабоизлучающий	500 ... 1000	0,65 ... 0,75
огнеупорный, сильно излучающий	500 ... 1000	0,8 ... 0,9
шамотный	20	0,85
»	1000	0,75
»	1200	0,59
динасовый, огнеупорный	1000	0,66
динасовый, неглазурованный шеро- ховатый	1000	0,8
то же	1100	0,85
огнеупорный, корундовый	1000	0,46
огнеупорный, магнезитовый	1000 ... 1300	0,38
красный, шероховатый	20	0,88 ... 0,93
силиманитовый (33 % SiO_2 , 64 % Al_2O_3)	1500	0,29
силикатный	1230	0,66
Кирпичная кладка оштукатуренная	20	0,94
Кожа дубленая	—	0,75 ... 0,80
Корундовый наждак грубый	80	0,85
Кремнезем гранулированный в порошке	—	0,48
Кремний (селикагель) в порошке	—	0,30
Краски масляные различных цветов	100	0,92 ... 0,96
Краска		
кобальтовая, синяя	—	0,7 ... 0,8
кадмиевая, желтая	—	0,28 ... 0,33
хромовая, зеленая	—	0,65 ... 0,7
Краситель синий, метиленовый, в сухом порошке	—	0,8
крезиловый, красный в сухом порошке	—	0,4
Лак		
черный матовый	40 ... 100	0,96 ... 0,98
черный, блестящий, распыленный на железо	20	0,87
белый	40 ... 100	0,8 ... 0,95
акелитовый	80	0,93
жаропрочный	100	0,92
Лед		
гладкий	0	0,97
покрытый крупным инеем	0	0,98

Продолжение табл. 9.2

Материал	Температура, °С	ε _T
Мрамор сероватый, полированный	20	0,93
Магnezит измельченный	—	0,20 ... 0,30
Песок	—	0,60
Резина		
твердая	20	0,95
мягкая, серая, шероховатая	20	0,86
Руберойд	20	0,93
Сажа		
ламповая	20 ... 400	0,95 ... 0,97
с жидким стеклом	20 ... 200	0,96
нанесенная на твердую поверхность	50 ... 1000	0,96
Слюда, толстый слой	—	0,72
Слюда		
в порошке, агломерированном в силикате	—	0,81 ... 0,85
в тонком порошке	—	0,44
Смола	—	0,79 ... 0,84
Снег	—	0,8
Стекло	20 ... 100	0,94 ... 0,91
»	250 ... 1000	0,87 ... 0,72
»	1100 ... 1500	0,70 ... 0,67
Стекло матовое	20	0,96
Сукно черное	20	0,98
Тальк в тонком порошке	—	0,24
Ткань асбестовая	—	0,78
Толь	206	0,91 ... 0,93
Уголь очищенный (0,9 % золы)	100 ... 600	0,81 ... 0,79
Угольная нить	1000 ... 1400	0,53
Фарфор		
белый, блестящий	—	0,70 ... 0,75
глазурованный	20	0,92
Флюорит натуральный, измельченный	—	0,30 ... 0,40
Цемент	—	0,54
Шеллак		
черный, блестящий, на луженном		
железе	20	0,82
черный, матовый	75 ... 150	0,91
Шлаки котельные	0 ... 100	0,97 ... 0,93
»	200 ... 500	0,89 ... 0,78
»	600 ... 1200	0,76 ... 0,70
»	1400 ... 1800	0,69 ... 0,67
Штукатурка шероховатая, известковая	10 ... 90	0,94

Коэффициент излучательной способности, определенный интегрированием в области от λ_1 до λ_2 , называется коэффициентом частичной излучательной способности:

$$\epsilon_r = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda T} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda T}^0 d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \epsilon_{\lambda} M_{\lambda T}^0 d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda T}^0 d\lambda}.$$

Коэффициент ϵ_r зависит от пределов интегрирования. Если объект измерения рассматривается под углом $< 45^\circ$ к нормали, то ϵ_{λ} , ϵ_r и ϵ_T практически независимы от направления излучения. Заметные отклонения от закона Ламберта присущи и металлам с блестящей поверхностью, при больших углах к нормали испускающих поляризованное излучение. Сводные данные об излучательной способности различных материалов приведены в табл. 9.2.

Закон Планка формулируется в следующем виде:

$$M_{\lambda T}^0 = C_1 \lambda^{-5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1}. \quad (9.1)$$

Для части спектра, где $e^{C_2/\lambda T} \gg 1$, можно пренебречь единицей в знаменателе и получить закон Вина:

$$M_{\lambda T}^0 = \frac{C_1}{\lambda^5 e^{C_2/\lambda T}}. \quad (9.2)$$

При $\lambda T < 3 \cdot 10^{-3}$ мк погрешность формулы Вина не превышает 1 %.

Интегрирование уравнения (9.1) по всему спектру при фиксированном значении температуры приводит к закону Стефана — Больцмана:

$$M_T^0 = \sigma T^4. \quad (9.3)$$

Для нечерного тела с коэффициентом излучательной способности при той же температуре полная энергия излучения определяется формулой

$$\bar{M}_T = \epsilon_T \sigma T^4. \quad (9.4)$$

9.3. Практические следствия законов излучения

Закон Планка устанавливает обобщенную связь между плотностью излучения, длиной волны излучения и температурой излучателя. Это открывает, по крайней мере, три принципиальные возможности определения температуры излучателя по измеренным характеристикам излучения.

Радиационная пирометрия. Закон Стефана — Больцмана для интегрального потока энергии излучения является теоретической основой радиационной пирометрии. Приборы, предназначенные для измерения температуры тела по тепловому действию его полного излучения, называются пирометрами полного излучения. Эти пирометры градуируются по черному излучателю, и поэтому при измерении температуры черного тела их показания дают действительное значение измеряемой температуры. При измерении температур реальных фи-

зических тел, ввиду их меньшей излучательной способности, пирометры дают заниженные показания, соответствующие некоторой условной температуре, называемой радиационной температурой тела.

Радиационная температура нечерного тела T_p , имеющего температуру T и коэффициент излучательной способности ϵ_T , численно равна температуре T_p черного тела, при которой интенсивность полного излучения черного тела $M_{T_p}^0$ равна интенсивности полного излучения нечерного тела M_T : $M_{T_p}^0 = M_T$. Согласно формулам (9.3), (9.4) $M_{T_p}^0 = \sigma T_p^4$, $M_T = \epsilon_T \sigma T^4$, следовательно, $\sigma T_p^4 = \epsilon_T \sigma T^4$. Таким образом, температуру нечерного тела можно определить по измеренной температуре, используя формулу $T = T_p \sqrt[4]{1/\epsilon_T}$.

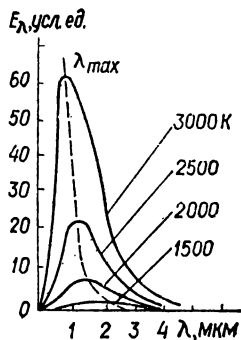


Рис. 9.1. Зависимость монохроматической энергии излучения от длины волны и температуры для черного тела.

излучения в сторону коротких волн объясняется изменением цвета раскаленного тела при повышении его температуры. Закон смещения установлен Вином в виде зависимостей, являющихся следствием закона Планка:

$$\lambda_{\text{макс}} = AT^{-1}, \quad (9.5)$$

$$M_{\lambda T}^0 = b_1 T^5, \quad (9.6)$$

где $A = 0,28978 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$; $b_1 = 12,816 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/м}^3 \cdot \text{К}^5$. Из уравнения (9.5) следует, что при комнатной температуре (289,6 К) $\lambda_{\text{макс}} = 10 \text{ мкм}$, а в видимую область ($\lambda_{\text{макс}} < 0,8 \text{ мкм}$) этот максимум попадает при $T > 3620 \text{ К}$.

При измерениях температуры яркостными визуальными пирометрами наблюдают не энергетическую, а видимую человеческим глазом яркость $L'_{\lambda T}$, которая прямо пропорциональна энергетической яркости $L_{\lambda T}^0$, т. е. $L'_{\lambda T} = K_{\lambda} L_{\lambda T}^0$, где K_{λ} — коэффициент пропорциональности. При этом формула Вина преобразуется к виду

$$L'_{\lambda T} = K_{\lambda} \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \quad (9.7)$$

где K'_λ — постоянный коэффициент для данной длины волны, включающий константы K_λ и C_1 . Для нечерного тела с коэффициентом излучения $\epsilon_{\lambda T}$ при той же температуре видимая яркость меньше, чем для черного тела:

$$L_{\lambda T} = \epsilon_{\lambda T} K'_\lambda \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}. \quad (9.8)$$

Квазимонохроматические пирометры, измеряющие температуру по монохроматической яркости, градуируются по черному излучателю. Поэтому только при измерении температуры черного тела их показания будут соответствовать действительной температуре. При измерении температуры реальных физических тел, характеризующихся меньшей излучательной способностью, чем черное тело, показания квазимонохроматических пирометров определяют не действительную, а так называемую яркостную температуру тела.

Яркостная температура S нечерного тела с коэффициентом излучения $\epsilon_{\lambda T}$, имеющего температуру T , численно равна температуре S черного тела, при которой монохроматическая яркость $L_{\lambda S}$ черного тела равна монохроматической яркости $L'_{\lambda T}$ данного нечерного тела: $L_{\lambda S} = L'_{\lambda T}$. Согласно формулам (9.7), (9.8)

$$L_{\lambda S} = K'_\lambda \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda S}}, \text{ а } L'_{\lambda T} = \epsilon_{\lambda T} K'_\lambda \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \quad (9.9)$$

поэтому, приравнявая правые части формул (9.9) и сокращая на $K'_\lambda \lambda^{-5}$, получаем

$$\frac{1}{S} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\epsilon_{\lambda T}}. \quad (9.10)$$

Яркостная температура всегда ниже действительной. При малых $\epsilon_{\lambda T}$ и высокой температуре разность $T - S$ может достигать нескольких сотен градусов.

В практических измерениях яркостной температуры корректность определения зависит, главным образом, от правильности определения монохроматической излучательной способности объекта. В большинстве случаев яркостные пирометры работают на длине волны $\lambda = 0,65$ мкм. Излучательные способности пирометра на этой длине волны отличаются от интегральных. Для типичных случаев они приведены в табл. 9.3.

Квазимонохроматическим пирометром измеряют отношение яркости объекта, температуру которого необходимо измерить, к яркости источника излучения (черного тела). Таким же способом экспонируют шкалу в область высоких температур при воспроизведении ее от точки затвердевания золота. Обозначая через T_0 температуру черного тела при температуре затвердевания золота и используя формулу (9.7), получаем

$$L_{\lambda T_0} = K'_\lambda \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_0}}. \quad (9.11)$$

При более высокой, но неизвестной температуре черного тела T аналогично имеем

$$L_{\lambda T} = K'_\lambda \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}. \quad (9.12)$$

Т а б л и ц а 9.3. Спектральная излучательная способность некоторых материалов для $\lambda = 0,55$ мкм

Материал	ϵ_{λ}	Материал	ϵ_{λ}
Бериллий твердый и жидкий	0,61	Родий	
Ванадий		твердый	0,24
твердый	0,35	жидкий	0,30
жидкий	0,32	Серебро твердое и жидкое	0,07
Вольфрам твердый	0,43	Свинец жидкий	0,5...0,6
при 1750 °С		Титан	
Железо твердое	0,39	твердый	0,63
Золото		жидкий	0,65
твердое	0,14	Торий	
жидкое	0,22	твердый	0,36
Иридий твердый	0,30	жидкий	0,40
Иттрий твердый и жидкий	0,35	Углерод твердый	0,93
Марганец твердый и жидкий	0,59	Уран	
Медь		твердый	0,54
твердая	0,11	жидкий	0,34
жидкая	0,15	Хром	
Молибден		твердый	0,34
твердый	0,37	жидкий	0,39
жидкий	0,40	Цирконий	
Никель		твердый	0,32
твердый	0,36	жидкий	0,30
жидкий	0,37	Сталь	
Ниобий		твердая	0,35
твердый	0,37	твердая углеро-дистая	0,44
жидкий	0,40	жидкая	0,37
Палладий		Чугун	
твердый	0,33	твердый	0,37
жидкий	0,37	жидкий при 1540 °С	0,40
Платина		Алюмель	0,37
твердая при 980 °С	0,30	Константан	0,35
твердая при 1480°С	0,30	Монель	0,37
жидкая	0,38	Хромель	0,35
Платинородий (90 % Pt—10 % Ro)	0,27		

Металлы и сплавы с окисленной поверхностью

Алюминий	0,22—0,40	Иттрий	0,60
Бериллия окись черная при 1310 °С	0,56	Кобальт	0,75
То же при 1650 °С	0,54	Магний	0,20
Бериллия окись белая при 1310 °С	0,44	Медь	0,70
То же при 1650 °С	0,51	Никель	0,90
Ванадий	0,70	Ниобий	0,70
Железо	0,70	Олово	0,32—0,60
		Титан	0,50
		Торий при 1790 °С	0,40
		То же при 2040 °С	0,82

Материал	ϵ_λ	Материал	ϵ_λ
Уран	0,30	Чугун	0,70
Хром	0,60	Алсмель	0,87
Церий	0,58...0,80	Константан	0,84
Цирконий	0,40	Хромель	0,78
Сталь			
нержавеющая	0,85		
углеродистая	0,80		

Прочие материалы

Борид тантала при 1820 °С	0,70	Карбид циркония при 1820 °С	0,96
Борид тиркония при 1820 °С	0,70	Карбокорунд	0,80
Карбид тантала при 1820 °С	0,67	Соляная ванна	0,80
Карбид титана при 1820 °С	0,96	Фарфор	0,25...0,50
		Шамот	0,70...0,80

Деля выражение (9.12) на (9.11), получаем

$$\frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{L_{\lambda T}}{L_{\lambda T_0}} = \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}. \quad (9.13)$$

Из уравнения (9.13) следует, что для определения искомой температуры достаточно знать отношение яркостей $L_{\lambda T}/L_{\lambda T_0} = 1/\tau$.

Отношение яркостей излучателя с неизвестной температурой T и излучателя с известной, более низкой, температурой T_0 при использовании квазимонохроматического визуального пирометра определяют с помощью ослабляющих устройств (секторные диски и поглощающие стекла). Наиболее надежным ослабляющим устройством, в котором можно получить заданный и точно определяемый коэффициент пропускания τ_λ , является вращающийся со скоростью 100...300 об/с металлический диск с вырезанными в нем секторами. Это устройство обеспечивает неселективное ослабление яркости излучателя. Коэффициент пропускания диска равен $\alpha/2\pi$, где α — сумма углов раскрытия секторов диска, которая не должна быть меньше двух угловых градусов. Таким образом, наименьшее значение коэффициента пропускания диска равно $1/180$. При помощи поглощающих стекол можно получить значительно меньшие коэффициенты пропускания для экстраполяции к более высоким температурам. Кроме того, поглощающее стекло является более простым и удобным для применения в качестве ослабляющего устройства, поэтому технические квазимонохроматические визуальные пирометры комплектуются поглощающими стеклами.

Если при наблюдении черного излучателя с температурой T через ослабляющее устройство с коэффициентом пропускания τ ослабленная яркость излучателя $\tau L_{\lambda T}$ равна яркости черного тела с температурой T_0 , то $L_{\lambda T} = L_{\lambda T_0}$.

$\frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\tau}$, обозначаемая через A , называется пирометрическим

ослаблением, характеризующим поглощение стекла. Таким образом, из выражения (9.13) получаем $1/T_0 - 1/T = A$. С помощью этого уравнения можно экстраполировать температурную шкалу, исходя из опорной точки T_0 и используя набор поглощающих стекол и секторных дисков. Кроме того, этим уравнением можно пользоваться при градуировке и проверке яркостных пирометров.

Цветовая пирометрия. Анализ уравнения Планка, частная его формулировка в виде соотношений Вина свидетельствуют о том, что по мере повышения температуры тела центр тяжести кривой его излучения смещается в сторону более коротких волн. Таким образом, можно определять температуру по характеру распределения энергии в спектре излучения тела. Первоначально предполагалось определять температуру по цвету излучения. Поэтому температура, определяемая таким образом, была названа цветовой, а совокупность методов такой термометрии — цветовой пирометрией. Цветовая пирометрия основывается исключительно на качественном характере распределения энергии излучения по спектру. Ниже приведены формулировки цветовой температуры (по Рибо).

1. Цветовая температура источника — температура черного тела, которое имеет то же относительное спектральное распределение, что и изучаемый источник.

2. Цветовой температурой источника является температура черного тела, которое для длин волн λ_1 и λ_2 обладает таким же отношением монохроматических яркостей, что и исследуемый источник.

3. Цветовая температура источника определяется сравнением излучения этого источника с излучением черного тела, температура которого изменяется до тех пор, пока его излучение станет того же цвета, что и источник.

Пирометры спектрального отношения так же, как и квазимонохроматические, поверяются по черному излучателю, поэтому при измерении температуры черного тела показания пирометра соответствуют действительной температуре. У реального физического тела коэффициенты излучательной способности $\epsilon_{\lambda_1 T}$, $\epsilon_{\lambda_2 T}$ для длин волн λ_1 и λ_2 могут различаться, следовательно, отношение $L_{\lambda_1 T}/L_{\lambda_2 T}$ может отличаться от аналогичного отношения для черного тела при той же температуре. Поэтому показания пирометра спектрального отношения при измерении температуры нечерного тела могут отличаться от действительной температуры. Эта условная температура называется цветовой температурой тела. Цветовая температура T_c реального излучателя, имеющего действительную температуру T , — это такая температура черного тела, при которой отношение спектральных яркостей $L_{\lambda_1 T_c}^0/L_{\lambda_2 T_c}^0$ черного тела равно отношению спектральных яркостей $L_{\lambda_1 T}/L_{\lambda_2 T}$ данного тела, т. е. $L_{\lambda_1 T_c}^0/L_{\lambda_2 T_c}^0 = L_{\lambda_1 T}^0/L_{\lambda_2 T}^0$. Используя уравнения (9.8) и (9.9), получаем зависимость между цветовой температурой нечерного тела и его действительной температурой:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\ln \frac{\epsilon_{\lambda_1 T}}{\epsilon_{\lambda_2 T}}}{C_2 \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}. \quad (9.14)$$

Из формулы (9.14) видно, что если монохроматические коэффициенты излучательной способности $\epsilon_{\lambda_1 T}$ и $\epsilon_{\lambda_2 T}$ равны, то правая часть формулы превращается в нуль, следовательно, цветовая температура тела равна его действительной температуре. Такое равенство свойственно так называемым серым излучателям, у которых для всех длин волн спектра излучения монохроматический коэффициент имеет одно и то же значение.

Цветовая температура многих твердых и жидких тел значительно меньше отличается от действительной температуры по сравнению с радиационной или яркостной. Кроме того, поправки для перехода от цветовой к действительной температуре определяются с большой точностью, так как факторы, влияющие на спектральные коэффициенты излучательной способности $\epsilon_{\lambda_1 T}$ и $\epsilon_{\lambda_2 T}$, значительно меньше влияют на изменение отношения данных коэффициентов. Значительно меньше на результаты измерения цветовой температуры влияет неселективное лучепоглощение в промежуточной среде.

Если в левой части уравнения (9.14) сделать подстановку, применив формулу (9.4), то после некоторых преобразований получим зависимость между переменными T_c и $L_{\lambda_1 T}/L_{\lambda_2 T}$:

$$\ln(L_{\lambda_1 T}/L_{\lambda_2 T}) = \frac{1}{T_c} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) C_2 + 5 \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}.$$

Таким образом, логарифм отношения $L_{\lambda_1 T}/L_{\lambda_2 T}$ излучателя прямо пропорционален обратному значению цветовой температуры. Этой зависимостью можно пользоваться при градуировке пирометров спектрального отношения.

Сравнительные характеристики методов пирометрии излучения. Недостатком пирометров излучения являются систематические погрешности показаний, возникающие вследствие отклонения свойств реальных излучателей от идеального излучателя — черного тела, по которому градуируются пирометры.

Для градуировки пирометров излучения применяют электрические печи специальной конструкции, излучение внутренней полости которых приближается к излучению черного тела. Схема устройства электропечи показана на рис. 9.2. Внутри графитовой трубы, которую используют как нагреватель, установлен ряд диафрагм. Диафрагмы одной половины печи имеют отверстия, через которые пирометром излучения визируется внутренняя полость трубы. Излучение стенок этой полости, имеющих одинаковую температуру, приближается к излучению черного тела. Коэффициент излучательной способности рассчитывается по геометрическим размерам и коэффициенту отражения графита.

Температурой частичного излучения называется температура черного излучателя, при которой пирометром частичного излучения в диапазоне длин волн от λ_1 до λ_2 воспринимается мощность излучения, испускаемая данным телом в том же диапазоне длин волн. Коэффициент излучательной способности частичного излучения, являющийся опре-

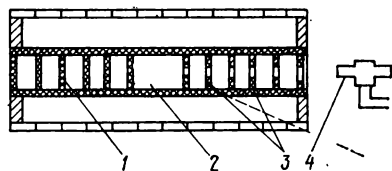


Рис. 9.2. Схема электропечи «черное тело»:

1 — графитовая труба; 2 — внутренняя полость трубы; 3 — диафрагма; 4 — пирометр.

деляющим при измерении температуры, зависит от ширины спектра и от спектрального распределения воспринимаемого излучения, спектральных характеристик приемника излучения, фильтров (т.е. конструкции пирометра). Таким образом, для объекта, имеющего одну и ту же действительную температуру, может быть получена различная измеряемая температура частичного излучения.

При градуировке пирометра излучения с применением нечерных излучателей определяют не действительную, а «черную» температуру тела. Поэтому показания поверяемого пирометра соответствуют действительной температуре только при измерениях температуры черного тела.

Расчет энергии излучения абсолютно черного и серых излучателей. Энергия рассчитывается по уравнениям Планка, Вина, Кирхгофа и Стефана — Больцмана.

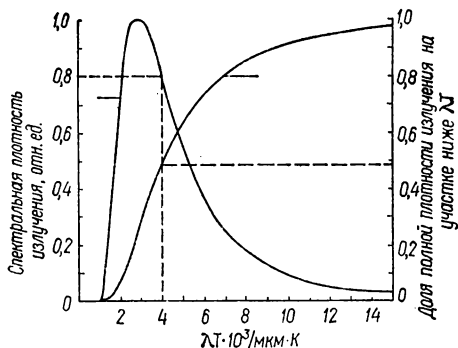


Рис. 9.3. Универсальные кривые излучения абсолютно черного тела.

В современных условиях высокой оснащенности устройствами электронного счета с помощью простейшей счетной машины можно скорее получить искомый результат, чем по таблицам, приведенным в старых справочных изданиях. В качестве аргумента удобно выбирать произведение λT . Результаты расчетов по такому аргументу представлены на рис. 9.3.

Монохроматический коэффициент излучательной способности любого излучателя $\epsilon_{\lambda T}$ является функцией

длины волны и температу-

ры, зависит не только от материала излучателя, конструкции, но и от состояния поверхности, т.е. шероховатости, состояния окисления и др. Поэтому $\epsilon_{\lambda T}$ в зависимости от температуры и длины волны определяется эмпирически. Только для некоторых материалов, например для вольфрама, можно получить повторяемые значения (рис. 9.4).

Если коэффициент излучательной способности мало изменяется с изменением температуры в видимой области спектра, то достаточно его определить только при одной температуре. Если ϵ_{λ} не изменяется в широком спектральном диапазоне, то спектральная плотность излучения тела отличается от плотности излучения черного тела в этом диапазоне на постоянную величину. Такие тела называются серыми излучателями.

Селективно излучающие тела (газы, пары и органические вещества) в одних диапазонах спектра не излучают энергию, но в других ведут себя как черные излучатели или излучают только часть черного излучения, изменяющегося с длиной волны. По характеру изменения монохроматического коэффициента излучательной способности все источники делятся на три типа: абсолютно черное тело, $\epsilon(\lambda) = \epsilon = 1$; серое тело, $\epsilon(\lambda) = \epsilon < 1$; селективные излучатели, для которых $\epsilon(\lambda)$ изменяется с длиной волны. В ограниченном спектральном диапазоне селективные излучатели иногда рассматриваются как серые тела.

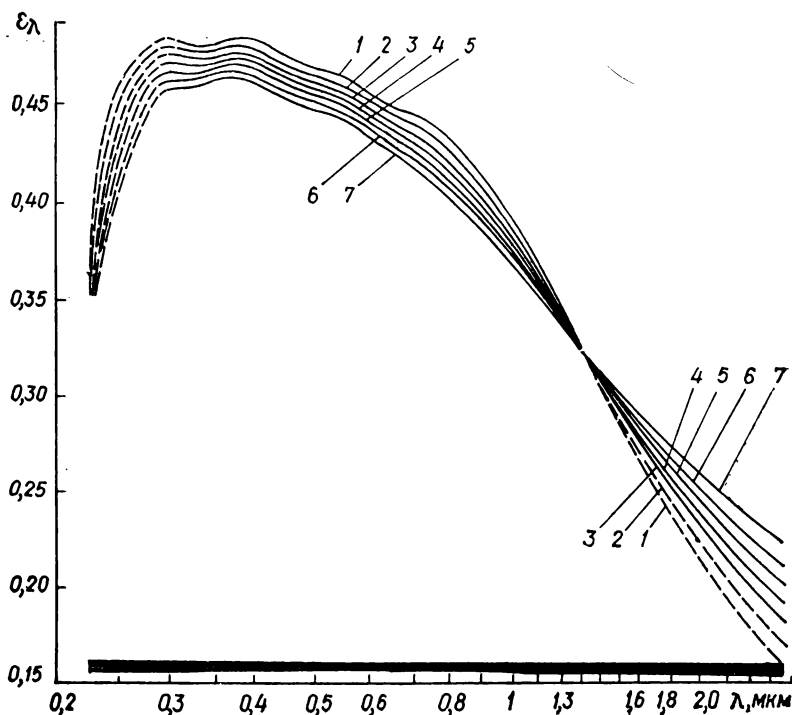


Рис. 9.4. Спектральные характеристики вольфрама при T , К:
 — 1600; 2 — 1800; 3 — 2000; 4 — 2200; 5 — 2400; 6 — 2600; 7 — 2800.

9.4. Погрешности пирометров излучения

Коэффициенты излучательной способности многих тел зависят от длины волны и температуры, а также от конструкции изделия и свойств поверхности тел. Поэтому рекомендации о влиянии коэффициента излучательной способности на показания различных типов пирометров носят общий характер. Значения коэффициентов излучательной способности различных материалов приведены в табл. 9.2 и 9.3.

Погрешность пирометра, обусловленная ϵ_λ . Зависимость между яркостной температурой объекта S_λ , измеренной пирометром, и его действительной температурой T определяется уравнением (9.10) при $T \gg T_{\text{окр}}$ ($T_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды или стенок). Поправка, которую необходимо прибавлять к измеренной квазимонохроматическим пирометром яркостной температуре (ΔT) для получения действительной температуры объекта, определяется выражением

$$\Delta T = \frac{AT^2}{1 - AT}, \quad (9.15)$$

где $A = -\frac{\lambda}{C_2} \ln \epsilon_\lambda$. При известных ϵ_λ и λ можно найти коэффициент A и поправку к яркостной температуре (рис. 9.5, табл. 9.4).

Т а б л и ц а 9.4. Поправка к яркостной температуре на коэффициент излучательной способности ($\Delta T = T - S$)

S, К	ΔT при ϵ_λ , равном								
	0,16	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
1000	119	80	59	44	33	24	17	10	0
1100	146	98	72	54	40	29	20	13	6
1200	176	118	86	64	48	35	24	15	7
1300	209	140	102	76	57	41	29	18	8
1400	246	163	119	89	66	48	33	21	10
1500	286	189	137	102	76	55	38	24	11
1600	329	217	157	117	87	63	43	27	13
1700	377	247	178	132	98	71	49	30	14
1800	429	279	201	149	110	80	55	34	16
2000	543	352	251	186	137	99	68	42	20
2200	676	433	308	227	167	121	83	51	24
2400	827	524	371	272	201	145	91	61	28
2600	1000	627	442	323	237	170	117	72	33
2800	1196	740	519	379	277	199	136	84	39
3000	1416	867	604	439	320	229	157	96	45
3600	2251	1325	907	651	472	333	228	139	65

При точном измерении действительных температур раскаленных объектов методами яркостной пирометрии вводимая в показания оптического пирометра поправка не отличается высокой достоверностью. Поэтому в случае промышленных измерений температуры объектов с относительной погрешностью менее 0,1 необходимо знать коэффициенты излучательной способности объектов.

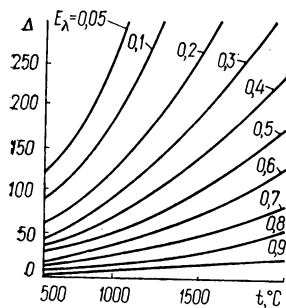


Рис. 9.5. Кривые поправки на коэффициент излучательной способности ($\lambda = 0,65$ мкм).

Для тел, имеющих большой разброс значений коэффициента излучательной способности, последний необходимо корректировать значениями, определенными при повторных измерениях (например, при помощи ПТ). Если в объекте измерения высверлить в некоторых местах цилиндрические полости, то в этих местах объект является черным излучателем. Измеряя температуру в полостях, а затем на нетронутой поверхности, определяют S , T , $\epsilon_{0,65}$, A .

Погрешность пирометра, обусловленная интегральным коэффициентом излучательной способности ϵ_T . Зависимость между радиационной температурой объекта T_p , измеренной пирометром, и его действительной температурой T при $T \gg T_{окр}$ выражается уравне-

нием $T_p = T \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_T}}$. Поправка, которую необходимо прибавлять к измеренной пирометром полного излучения радиационной температуре для получения действительной температуры объекта, определяется выражением

$$\Delta T = T - T_p = T \left(1 - \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon_T}} \right). \quad (9.16)$$

В основном коэффициент излучательной способности зависит от температуры и длины волны. Поэтому полный коэффициент излучательной способности ε_T определяется из уравнения

$$\varepsilon_T = \frac{M_T}{M_T^0} = \frac{\int_0^\infty M_\lambda \varepsilon_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty M_\lambda d\lambda}.$$

Если у данного объекта монохроматический коэффициент излучательной способности для разных длин волн практически одинаков, то он равен полному коэффициенту излучательной способности, т. е. $\varepsilon_{\lambda T} = \varepsilon_T$. При калибровке пирометра полного излучения по черному телу и известной действительной температуре объекта измерения T $\varepsilon_T = (T_p/T)^4$.

Погрешность пирометра, обусловленная коэффициентом частичной излучательной способности ε_λ . Зависимость между действительной температурой T , температурой частичного излучения T_λ и коэффициентом излучательной способности ε_λ нельзя выразить формулами из-за изменчивости диапазона длин волн и распределения спектральной чувствительности пирометра частичного излучения от λ_a до λ_x . Коэффициент излучательной способности определяется интегрированием уравнения в рабочем диапазоне длин волн данного пирометра.

Для пирометра частичного излучения можно найти зависимость между T , T_λ и ε_λ , если известна характеристика сигнала $U = f(T)$ и его величина пропорциональна мощности измеряемого излучения. Последнее условие справедливо для пирометров с термоэлектрическими и фотоэлектрическими приемниками излучения. По известной зависимости температуры от сигнала пирометра находят сигнал U_T для черного тела и сигнал U_λ для объекта. Зависимость радиационной и частичной температур от действительной температуры для пирометров полного и частичного излучения определяется экспериментально с помощью нейтрального ослабления мощности излучения черного тела (как в случае квазимонохроматических пирометров). Если зависимости $T = f(T_p)$ и $T = f(T_\lambda)$ представить в виде зависимостей ε_T и ε_λ от действительной и измеренной температур, то можно определить коэффициент излучательной способности или при известном ε и измеренной температуре определить действительную температуру.

Значение температуры частичного излучения находится между радиационной температурой и яркостной температурой. В зависимости от расположения и ширины спектрального участка пирометр частичного излучения является либо пирометром полного излучения, либо квазимонохроматическим пирометром.

Погрешность пирометра, обусловленная отношением коэффициентов излучательной способности $\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2}$. Зависимость между измеренной пирометром цветовой температурой объекта T_c и его действительной температурой T определяется из уравнения (9.14):

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \frac{1}{C_2} \ln \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} = A.$$

Поправка, которую необходимо прибавлять к измеренной пирометром цветовой температуре для получения действительной температуры, определяется выражением

$$\Delta T = T_c - T = \frac{AT_c^2}{1 + AT_c} \quad (9.17)$$

Если измерение производится в двух различных диапазонах длин волн, то отношение $\varepsilon_{\lambda_1}/\varepsilon_{\lambda_2}$ находят из уравнения (9.3). При известных ε_{λ_1} и ε_{λ_2} из уравнения (9.17) определяют погрешность измерения.

Погрешности, обусловленные коэффициентами излучательной способности пирометров различных типов. Согласно данным, приведенным в табл. 9.2, без учета поправки на коэффициент излучательной способности при промышленных измерениях температуры допускаемая методическая погрешность составляет примерно 0,5 ... 1,5 %.* Разброс значений температуры, измеренной различными пирометрами, приведен в табл. 9.5.

Квазимонохроматический пирометр с эффективной длиной волны 0,65 мкм (см. табл. 9.5) можно применять без учета поправок только при степени черноты объекта больше 0,9, что практически не всегда выполняется. Для справедливости указанного условия необходимо создание или наличие у объекта полостей, приближающих величину его излучения к излучению черного тела.

В квазимонохроматическом пирометре, созданном на основе инфракрасного излучения ($\lambda = 2,5$ мкм), а также в пирометре полного излучения необходимо, чтобы $\varepsilon_\lambda > 0,9$. Без учета поправки эти пирометры пригодны только для сравнительно грубых измерений. Коэффициент излучательной способности материалов в инфракрасной области уменьшается с увеличением длины волны, за исключением многих окислов, у которых он возрастает.

Поправки для пирометров полного излучения, определяемые экспериментально, часто несколько меньше поправок, рассчитанных по формулам (9.15) — (9.17), так как в пирометрах полного излучения никогда не используется весь спектр (от нуля до бесконечности). При этом в инфракрасном участке спектра отсекается больше энергии, чем в ультрафиолетовом. В результате используемая пирометром энергия возрастает с увеличением температуры быстрее, чем возрастает полная интегральная энергия, что вызывает значительное снижение погрешностей. Это относится, в первую очередь, к пирометрам полного излучения, предназначенным для измерения высоких температур. В них используется сравнительно большая энергия коротковолнового излучения, поэтому допустимо применение стеклянных объективов,

* В технологических процессах, малочувствительных к колебаниям температуры, допустима несколько большая погрешность (например, в доменном производстве); в других случаях (например, при выращивании монокристаллов) предъявляются более жесткие требования к точности измерения.

Таблица 9.5. Расхождения между температурой, измеренной пирометрами различного действия, и действительной температурой тела

λ , мкм	ε ($\varepsilon_1/\varepsilon_2$)	Расхождения при T , К			
		500	1000	2000	3000
Пирометр полного излучения					
0— ∞	0,3	89	195	390	585
	0,6	60	120	240	360
	0,9	13	27	55	80
Квазимонохроматический пирометр					
0,65	0,3	(15)	60	230	500
	0,6	(6)	25	90	190
	0,9	(1)	5	20	40
2,5	0,3	55	200	600	1250
	0,6	22	80	300	630
	0,9	5	20	70	160
Пирометр спектрального отношения					
0,48 и 0,65	0,7	(11)	46	200	480
	0,9	(3)	13	60	130
	0,97	(1)	4	15	35
0,8 и 1,2	0,7	15	65	280	650
	0,9	2	18	75	180
0,8 и 1,2	0,97	1,2	5	20	45

Примечание. В скобках указаны значения, при которых применение пирометров допустимо, но не рекомендовано.

поглощающих значительную часть инфракрасного излучения. Таким образом, указанные пирометры близки по своим свойствам к коротковолновым квазимонохроматическим пирометрам.

В пирометрах полного излучения с более широкой спектральной характеристикой, снабженных, например, кварцевым (или флюоритовым) объективом*, последний действует почти так же, как стеклянный объектив в пирометрах, предназначенных для измерения высоких температур. Таким образом, указанные пирометры также близки по своим свойствам к коротковолновым монохроматическим пирометрам.

Если квазимонохроматический пирометр работает в более коротковолновом участке спектра, то его методические погрешности снижаются. Поскольку коэффициент излучательной способности большинства материалов повышается с уменьшением длины волны, методическая погрешность уменьшается в два — пять раз по сравнению с красной областью при использовании синей или ближней ультрафиолетовой части спектра. В этом случае применение квазимонохроматического пирометра реально только для измерения достаточно высоких температур (порядка 1200 °C).

* Такие объективы применяются в основном для измерения более низких температур, когда вследствие закона смещения излучение тела существенно смещено в инфракрасную область спектра.

Пирометры спектрального отношения, использующие видимую или ближнюю инфракрасную часть участка спектра (см. табл. 9.5), соответствуют средним требованиям по точности при $\epsilon_\lambda \geq 0,97$.

Методические погрешности пирометров снижаются при измерениях более низких температур. Однако при этом обычно повышаются требования к точности измерения и, кроме того, возникают затруднения из-за малой энергии, излучаемой телом. Поэтому пирометры, действие которых ограничено видимой частью спектра, нельзя применять для измерения температур ниже 1000 К. Пирометры, действие которых ограничено диапазоном инфракрасного излучения, имеют определенные перспективы для измерения низких температур и малопримодны для измерения высоких температур (см. табл. 9.5).

Погрешности в некоторых частных случаях пирометрии. В некоторых случаях технологический процесс связывают не с действительными температурами, а с показаниями пирометров. Такая связь практикуется на пирометрах всех рассмотренных типов, при этом в показаниях пирометров поправки не вводятся.

Основными факторами, влияющими на степень черноты, являются окисление и загрязнение поверхности излучающего тела, колебания состава материала, доля примесей, степень шероховатости поверхности и т.п. В результате получается несоответствие между колебаниями температуры тела и колебаниями показаний пирометра, что приводит к перемной методической погрешности.

Если характерный размер шероховатости меньше длин волн излучения, на которых работает пирометр, то не требуются дополнительные поправки на шероховатость. Поверхность может рассматриваться как гладкая. Если характерный размер шероховатости заметен, превышает рабочие длины волн излучения, то увеличивается степень черноты. При этом шероховатость обуславливает уменьшение отражательной способности в среднем на 20 %. В этом случае степень черноты определяется по формуле $\epsilon_{\text{ш}} = 0,2 + 0,8\epsilon_{\text{гд}}$, где $\epsilon_{\text{ш}}$ — степень черноты шероховатой поверхности; $\epsilon_{\text{гд}}$ — то же для гладкой поверхности.

Из анализа поправок для квазимонохроматических пирометров и пирометров полного излучения следует, что применительно к промышленным измерениям температуры погрешность, связанная с коэффициентами излучательной способности, не должна превышать 5...10 %. Однако нестабильность этих коэффициентов, зависящих от условий конкретного технологического процесса, вносит значительное затруднение в получение точных результатов измерения.

Пирометры спектрального отношения удовлетворяют более высоким требованиям относительно точности определения коэффициентов излучательной способности. При этом поправки обычно определяют непосредственно на объекте. С этой целью иногда проводят эксперименты, при которых измерение цветовой температуры излучающего объекта подтверждается одновременным измерением его действительной температуры при помощи термоэлектрического термометра, упрощенной модели черного тела или другим способом.

Для получения надежных поправок необходимо предварительное изучение спектральной характеристики излучения объекта. Это позволяет выбрать оптимальный для данного объекта спектральный участок, в котором поправки для пирометра спектрального отношения окажутся минимальными. Следует не только выбирать оптимальные эффективные длины волн, при которых отношение $\epsilon_{\lambda_1}/\epsilon_{\lambda_2}$ близко к единице и стабильно, но и учитывать используемые пирометром спектрального отношения конечные спектральные участки и неизбежные их изменения в отдельных образцах пирометров.

Погрешности, обусловленные поглощением среды. Погрешность пирометра, обусловленная поглощением излучения в промежуточной среде, является однозначной функцией интенсивности поглощения: $L_{\text{изм}} = L(1 - \alpha) = L\tau$, где L — яркость тела; α — коэффициент поглощения в среде используемого пирометром излучения. Подставляя в эту формулу вместо L значение яркости, определенное по формулам Вина или Стефана — Больцмана, получаем выражения для определения погрешности квазимонохроматического пирометра ΔS , пирометра полного излучения ΔT_p и пирометра спектрального отношения ΔT_c , вызываемые поглощением излучения в промежуточной среде:

$$\Delta S = S^2 \frac{\lambda \ln \tau}{C_2}, \quad \Delta T_p = T_p \left(1 - \sqrt[4]{\frac{\tau}{\tau_p}}\right), \quad \Delta T_c = T_c^2 \frac{\frac{\lambda_1 \lambda_2}{C_2} \ln \frac{\tau_1}{\tau_2}}{\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{C_2}}. \quad (9.18)$$

Зависимость погрешностей пирометров от температуры при 20 %-ном поглощении в промежуточной среде указана в табл. 9.6. Погрешности пирометров спектрального отношения рассчитаны для случая, когда в одном из используемых пирометром спектральном участке поглощение отсутствует, а в другом оно составляет 20 %, т. е. для случая резко селективного поглощения. Если поглощение неселективное ($\alpha_1 = \alpha_2$), то оно, как следует из формулы (9.18), совершенно не влияет на показания пирометра спектрального отношения, так как не изменяет измеряемое прибором отношение яркостей.

Таблица 9.6. Погрешности пирометров при 20 %-ном поглощении энергии излучения средой

Тип пирометра, условия измерений	Погрешность, К, для измеряемой температуры, К		
	1000	1500	2000
Полного излучения	50	75	100
Квазимонохроматический при $\lambda = 0,65$ мкм	17	25	35
$\lambda = 2,5$ мкм	85	100	135
Спектрального отношения при $\lambda_1 = 0,48$ мкм, $\lambda_2 = 0,65$ мкм	50	70	100
$\lambda_1 = 0,80$ мкм, $\lambda_2 = 1,20$ мкм	60	90	125

В промышленных условиях из-за запыленности и задымленности помещения, в котором находится раскаленное тело, а также из-за наличия паров воды коэффициент поглощения может значительно превышать 20 % и, следовательно, могут возрастать погрешности измерения. В таких условиях поглощение, как правило, непрерывно изменяется, так как концентрация пыли, дыма или паров воды не остается постоянной, поэтому введение поправок обычно не достигает цели. Иногда удается устранить влияние загрязнений среды на точность измерения температуры, применяя отдув сжатым воздухом. В некоторых конструкциях пирометров, работающих в инфракрасной части спек-

ра, для уменьшения влияния промежуточной среды на показания пирометра применяются светопроводы из стекла, кварца или сапфира. Приемный торцев светопровода размещают в непосредственной близости к объекту.

При измерении температуры деталей в герметичных печах приходится проводить измерения сквозь смотровое стекло. Ослабляющее действие смотрового стекла — пирометрическое ослабление A — для квазимонохроматического пирометра определяется по формуле $A = 1/T_0 - 1/T$. Поправка A практически не зависит от измеряемой температуры, так как эффективная длина волны квазимонохроматического пирометра незначительно изменяется с изменением измеряемой температуры, поэтому ею можно пренебречь. Если нельзя провести измерение температуры сквозь смотровое стекло и без него, то следует использовать другое стекло, идентичное смотровому по материалу и толщине.

Поправка A сохраняется, пока смотровое стекло остается чистым (это необходимо периодически проверять). При изменяющихся загрязнениях стекла учет влияния поглощения излучения в нем затруднителен. Для уменьшения скорости загрязнения полезно смотровое стекло снабдить заслонкой, открываемой только на время измерения.

Влияние смотрового стекла на показания пирометров частичного или полного излучения осложняется из-за вариации эффективной волны излучателя и селективности стекол на широком спектральном участке, используемом пирометрами. Поэтому определение поправки A следует проводить при нескольких значениях температуры в рабочем диапазоне с целью обеспечения возможности интерполяции поправок. Не следует преувеличивать универсальность получаемых таким образом поправок: они неизбежно зависят от материала и толщины смотрового стекла.

Погрешность пирометра, обусловленная неоднородностью температуры объекта. При эксплуатации квазимонохроматического пирометра или пирометра полного излучения его поле зрения должно быть целиком заполнено раскаленным изотермическим телом, температуру которого измеряют. Для пирометров спектрального отношения во можно частичное перекрытие используемых лучей в пределах, определяемых минимально допустимым для работы пирометра уровнем яркости объекта — уровнем светового потока, необходимого для неискаженной работы пирометра. Последнее условие относится ко всем случаям, когда раскаленное тело не полностью перекрывает поле зрения пирометра, например, поле зрения пирометра частично перекрывают холодные детали оборудования (витки индуктора высокочастотной печи и т.д.), вещества, связанные с ходом технологического процесса (отслаивающиеся и остывающие окислы), или сами раскаленные тела имеют небольшие размеры либо их положение в поле зрения пирометра не строго фиксировано. В указанных случаях применение квазимонохроматических пирометров и пирометров полного излучения вызывает большие погрешности, влияющие на результат измерения.

Погрешность, обусловленная частичным заполнением поля зрения пирометра спектрального отношения, принципиально не влияет на его показания, если световой поток достаточен для корректной работы электрической схемы пирометра. Поэтому цветовые пирометры предпочтительны для измерений с неполным использованием поля зрения.

Эффективные расчеты лучистого баланса между объектом измерения и приемником пирометра в общем представляют сложную задачу, решение которой практически целесообразно лишь в узком диапазоне простейших случаев. В табл. 9.7 приведены результаты эксперимен-

Т а б л и ц а 9.7. Показания пирометров при ступенчатой неоднородности температурного поля поверхности

Тип пирометра	λ , мкм	Показание пирометра, К	
		$T_1 = 1600 \text{ К},$ $T_2 = 1500 \text{ К}$	$T_1 = 1700 \text{ К},$ $T_2 = 1400 \text{ К}$
Полного излучения	0— ∞	1552	1590
Квазимонохроматический	0,48	1560	1640
	0,65	1555	1620
	2,50	1552	1575
	0,48 и 0,65	1572	1600
Спектрального отношения	0,80 и 1,20	1555	1660

тальных расчетов для случая, когда одна половина поля зрения пирометра занята поверхностью, имеющей температуру T_1 , а другая — поверхностью, имеющей температуру T_2 . Разность температур поверхностей составляет 100 и 300 К. При сравнительно небольшой неоднородности температуры объекта показания всех пирометров близки к средней температуре в пределах поля зрения пирометра, но остаются несколько выше ее вследствие нелинейности уравнений лучистого баланса.

Из анализа предельного перехода $T_1 \rightarrow T_2$ следует, что при уменьшении неоднородности температуры объекта показания всех пирометров стремятся к его средней температуре; при увеличении неоднородности температуры показания пирометров полного излучения и инфракрасных квазимонохроматических пирометров остаются по-прежнему близкими к средней температуре и слегка превышают ее; показания квазимонохроматических пирометров, действие которых ограничено видимой частью спектра, и особенно показания пирометров спектрального отношения приближаются к максимальной температуре в пределах поля зрения пирометров.

Показания пирометров полного излучения и инфракрасных квазимонохроматических пирометров приближаются к средней неоднородной температуре, что обусловлено законом Релея — Джинса. Последний действителен при линейной связи между интенсивностью излучения и температурой. На этом основаны известные рекомендации о применении инфракрасного излучения при измерении средней температуры неоднородных пламен. Пирометры полного излучения или инфракрасные квазимонохроматические пирометры также предпочтительны для измерения средней температуры в условиях неизотермичности.

Приближенность показаний коротковолновых квазимонохроматических пирометров и пирометров спектрального отношения к максимальной температуре объясняется резким увеличением интенсивности излучения с возрастанием температуры, соответствующим закону Вина. Для пирометров спектрального отношения это обусловлено тем, что величина излучения более холодных участков измеряемого объекта слабо влияет на спектральное отношение интенсивностей, определяемое главным образом наиболее нагретыми участками. Поэтому, когда на раскаленной поверхности имеются частично отслаивающиеся и остывающие окислы, экранирующие поверхность, предпочтительным для измерения температуры является применение коротковолновых квазимонохроматических пирометров и, особенно, пирометров

спектрального отношения. Для контроля температуры местных перегревов свода печи целесообразно применение широкоугольных пирометров спектрального отношения, действие которых ограничено применением коротковолновых лучей. То же относится к измерению максимальной температуры неоднородного объекта.

Погрешность пирометра, обусловленная посторонним излучением. При измерении температуры нагретого тела в условиях, когда температура окружающих тел близка к измеряемой температуре или выше ее, излучение окружающих тел, отражаясь от испытуемого и попадая в пирометр, может существенно влиять на его показания, например, при измерении температуры тела, нагреваемого в печи, когда температура ее раскаленных стенок заметно превышает температуру объекта.

В общем случае яркость тела, воспринимаемая пирометром с учетом отраженного излучения окружающих тел, определяется уравнением

$$L_{\text{изм}} = \varepsilon L_x^0 + \frac{1}{\pi^2} \int \cos(n, d\Omega) \rho L_0 d\Omega,$$

где ε — коэффициент излучательной способности объекта; L_x^0 — яркость черного тела при температуре, равной температуре нагреваемого объекта; $n, d\Omega$ — углы падения лучей от окружающих тел на поверхность объекта; L_0 — яркость окружающих тел.

Если посторонние тела имеют одинаковую температуру T_0 и окружают измеряемый объект со всех сторон, то их излучение эквивалентно излучению черного тела. Частным случаем такой постановки вопроса является измерение температуры тела, расположенного в нагревательной печи. В первом приближении считается, что все стенки печи имеют одинаковую температуру и образуют замкнутую полость, охватывающую нагретое тело со всех сторон. Поскольку обычно нагреваемые объекты непрозрачны ($\varepsilon = 1 - \rho$), яркость раскаленного тела при температуре T_x с учетом отраженного излучения окружающих внешних тел определяется по формуле

$$L_{\text{изм}} = \varepsilon L_x^0 + (1 - \varepsilon) L_0^0, \quad (9.19)$$

где L_0^0 — яркость черного тела при температуре T_0 . Это уравнение можно переписать в виде

$$L_{\text{изм}} = L_x^0 \left[\varepsilon + (1 - \varepsilon) \frac{L_0^0}{L_x^0} \right]. \quad (9.20)$$

Подставляя в формулу (9.20) выражение для определения яркости по закону Стефана — Больцмана, получаем уравнение, описывающее показания пирометра полного излучения в приведенных условиях:

$$T_p = T_x \sqrt[4]{\varepsilon + (1 - \varepsilon) \frac{T_0^4}{T_x^4}}. \quad (9.21)$$

Подставляя в формулу (9.20) выражение для определения яркости по закону Вина, получаем уравнения, описывающие соответственно по-

казания квазимонохроматического пирометра и пирометра спектрального отношения:

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_x} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \left\{ \varepsilon + (1 - \varepsilon) \exp \left[-\frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_x} \right) \right] \right\}, \quad (9.22)$$

$$\frac{1}{T_c} = \frac{1}{T_x} + \frac{\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}}{C_2} \ln \left\{ \frac{\varepsilon_1 + (1 - \varepsilon_1) \exp \left[-\frac{C_2}{\lambda_1} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_x} \right) \right]}{\varepsilon_2 + (1 - \varepsilon_2) \exp \left[-\frac{C_2}{\lambda_2} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right]} \right\}. \quad (9.23)$$

Условие $\rho = 1 - \varepsilon$ справедливо только для непрозрачных тел и для квазимонохроматического излучения. При определении погрешностей им можно пренебречь, допуская, что уравнения (9.21) — (9.23) могут оказаться несколько неточными для объектов, излучение которых в рабочем спектральном диапазоне пирометра селективно.

Погрешности измерения температуры тел в печи даны на рис. 9.6,

где показаны пирометры, измеряющие температуру тела в печи по видимому и полному излучению, приведены в виде функции температуры стенок печи при постоянной действительной температуре тела, равной 1500 К. Показания пирометра спектрального отношения приведены для случая «серого» тела ($\lambda_1 = 0,45$, $\lambda_2 = 0,65$). Как видно из рисунка, показания пирометров приближаются к температуре печи. Следовательно, температура деталей, нагреваемых в печи, почти не поддается измерению пирометрами излучения, особенно при неоднородной температуре стенок печи. Если излучение стенок обеспечивает интенсивный нагрев деталей, то оно неизбежно влияет на точность показаний пирометров и тем больше, чем меньше эффективная степень черноты объекта. Поэтому при определении температуры в процессе нагрева алюминиевых заготовок появляются большие погрешности.

В принципе, не исключено экспериментальное определение отдельных величин, входящих в правую часть уравнения (9.19): $(1 - \varepsilon) L_0^0$ и εL_x^0 . Решив соответствующую систему уравнений, можно определить поправки и в дальнейшем вносить их в показания пирометра. Однако при такой методике неизбежно возникают погрешности из-за нестабильности коэффициента излучательной способности деталей, а также из-за нестабильности и неоднородности температуры печи. Эти погрешности невозможно уменьшить ввиду больших поправок.

Эффективная длина волны в пирометрии. Сигнал, возникающий в приемнике пирометра, как мера температуры объекта, определяется температурой объекта, спектральной характеристикой его излучения, спектральной чувствительностью самого приемника пирометра.

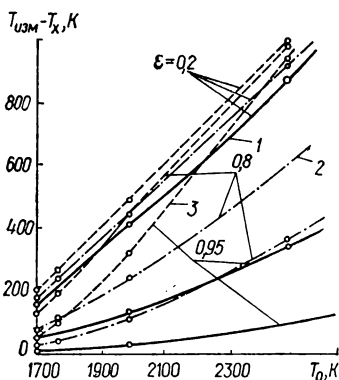


Рис. 9.6. Зависимость погрешностей измерения температуры деталей, находящихся в печи, от температуры стенок печи:

1, 2, 3 — погрешности, обусловленные соответственно пирометром полного излучения, квазимонохроматическим пирометром, пирометром спектрального отношения.

На спектральную характеристику излучения объекта оказывают влияние спектральные характеристики составных частей пирометра (линз, зеркал и т.д.). Область спектра излучения в пирометрах может ограничиваться или «вырезаться» встроенными в них селективными фильтрами. Во всем спектральном диапазоне такие средства ослабления потока излучения, как вращающиеся сектора, диафрагмы и серые стекла, поглощают излучение объекта измерения на некоторую постоянную величину. На рис. 9.7 показана блок-схема пирометра. При помощи «серых» клиньев и поляризационных фильтров излучение в пирометре ослабляется по определенному закону. Такие приемники излучения, как черненные термобатареи или болометры, являются «серыми» или черными приемниками, и сигналы, возникающие в них, не зависят от длины волны падающего потока излучения. Фотоэлементы

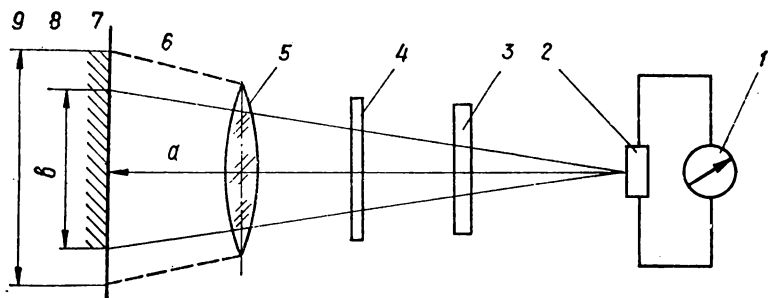


Рис. 9.7. Блок-схема пирометра:

1 — вторичный прибор; 2 — приемник излучения; 3 — селективный фильтр; 4 — ослабляющее устройство; 5 — объектив; 6 — показатель визирования; 7 — объект измерения; 8 — поле измерения, влияющее на энергетическую освещенность приемника излучения; 9 — поле наблюдения.

и фотосопротивления являются селективными приемниками и имеют спектральную характеристику чувствительности, форма и ширина которой определяется свойствами приемника. Состав и характеристики излучения объекта изменяются также вследствие отражений в оптических конструкциях пирометров.

В пирометрической практике измерение температуры обычно не заканчивается отсчетом по шкале пирометра. Определение искомой температуры тела требует дальнейших расчетов, основанных на законах теплового излучения и на спектральных характеристиках аппарата. Такие расчеты существенно упрощаются при условиях монохроматического излучения.

Длину волны, позволяющую при пирометрических расчетах заменить излучение в определенном спектральном диапазоне квазимонохроматическим излучением, называют эффективной длиной волны ($\lambda_{\text{э}}$). Для квазимонохроматических пирометров характерна одна единственная $\lambda_{\text{э}}$, при которой зависимости спектральной плотности излучения или яркости от температуры для черного тела изменяются так же, как и аналогичные зависимости указанных величин, измеренных пирометрами. Эффективная длина волны не зависит от температуры, если половина полосы пропускания фильтра меньше 5 нм. Эффективную длину волны можно определить графическим интегрированием и вычислением координаты центра тяжести площади, ограниченной кривой пропускания фильтра.

Замена излучения конечного участка спектра на монохроматическое и определение эффективной длины волны неприемлемы при проведении абсолютных энергетических расчетов. Введение λ_e с соответствующим упрощением ее вычисления допустимо только при относительных расчетах, связанных с определением отношений световых потоков или относительного изменения светового потока при изменении условий измерения. Теория эффективной длины волны детально разработана применительно к точной (в пределах возможности человеческого глаза) визуальной пирометрии сравнения.

Пирометры частичного излучения, действие которых ограничено сравнительно узким участком спектра, по свойствам можно отнести к квазимонохроматическим и, следовательно, распространить на них выводы теории эффективной длины волны, разработанные для визуальной пирометрии. Если действие пирометра частичного излучения ограничено более широким участком спектра (несколько десятых микрометра или больше), то его эффективная длина волны, рассчитанная по формулам визуальной пирометрии, оказывается нестабильной и значительно зависит от индивидуальных спектральных характеристик излучателя, особенно от значений его температуры.

В технических пирометрах выбор рабочего участка спектра обусловлен необходимостью наибольшей точности измерения действительной температуры реальных объектов. В каждом случае рабочий участок спектра определяется присущими только ему разнообразными условиями измерения и не может быть полностью связан с понятием эффективной длины волны. Ширина рабочего участка спектра также зависит от условий эксперимента, что в значительной мере определяет чувствительность прибора. Однако проблема эффективности длины волны накладывает определенные ограничения на ширину рабочего участка.

Индивидуальные спектральные характеристики фотоэлементов многих типов отличаются друг от друга значительно больше, чем оптические возможности человеческого глаза отличаются от «кривой средней видимости». Это часто обуславливает различия λ_e отдельных типов пирометров и отдельных образцов пирометров одного и того же типа.

Проблема эффективной длины волны для пирометров спектрального отношения возникает по тем же причинам, что и для квазимонохроматических пирометров. Однако методы решения этой проблемы для пирометров спектрального отношения отличны от методов, применяемых для квазимонохроматических пирометров. Эффективная длина волны для пирометров спектрального отношения рассчитывается по тем же формулам, что и для квазимонохроматических пирометров. В пирометре спектрального отношения отдельно для каждого из световых потоков измеряют их отношение.

9.5. Оптические пирометры с исчезающей нитью

Квазимонохроматические визуальные пирометры широко применяются для измерения яркостных температур выше 800 °C в производственных и лабораторных условиях. При использовании их для регистрации или автоматического регулирования температуры появляется ряд практических трудностей.

Принцип действия оптических пирометров основан на зависимости квазимонохроматической яркости черного тела от температуры, выражаемой законом Вина. При измерении температуры пирометром яркость излучателя сравнивается с яркостью калиброванного источника излу-

чения, встроенного в пирометр. Из рис 9.8 видно, что изображение излучателя при помощи линзы объектива пирометра фокусируется в плоскости нити пирометрической лампочки. Наблюдатель через окуляр и красный светофильтр видит нить лампы на фоне изображения излучателя. Регулируя реостатом 11 силу тока, проходящего через лампу от источника тока, наблюдатель плавно изменяет яркость нити до уравнивания с видимой яркостью излучателя. При равенстве яркостей излучателя и нити последняя «исчезает» на фоне изображения излучателя. Исходя из равенства величин яркостей, можно сделать заключение о равенстве яркостных температур излучателя и нити лампы. Выполненная заранее калибровка, при которой определяется

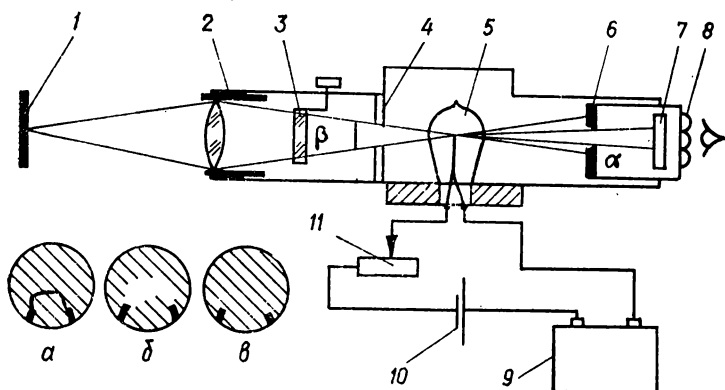


Рис. 9.8. Схема квазимонохроматического визуального пирометра:

1 — излучатель; 2 — линза объектива; 3 — поглощающее стекло; 4, 6 — диафрагмы; 5 — пирометрическая лампа; 7 — красный светофильтр; 8 — окуляр; 9 — показывающий прибор; 10 — источник тока; 11 — реостат; а, б, в — изображение нити накала и объекта соответственно при температуре нити, меньшей температуры объекта, при температуре нити выше, чем температура объекта, при температуре нити, равной температуре объекта; α , β — соответственно входной и выходной углы пирометра.

зависимость между силой тока, проходящего через лампу, и ее яркостной температурой, позволяет отсчитывать измеряемую температуру по показаниям прибора.

На схеме показаны две диафрагмы 4 и 6, которые ограничивают входной и выходной углы пирометра. Только при оптимальных значениях этих углов, зависящих от диаметра нити, ее формы и сечения, удается избежать дифракции и получить хорошее «исчезновение» нити. С этой же целью обращенная к глазу наблюдателя поверхность нити выполняется плоской.

Красный светофильтр выделяет узкий спектральный участок, в котором проводится сравнение яркостей. Ширина пропускания около 0,1 мкм. Она ограничена (рис. 9.9), с одной стороны, кривой спектральной чувствительности глаза V_λ , а с другой — кривой пропускания красного светофильтра τ_λ . Для расчета шкал квазимонохроматических пирометров в формулу Вина подставляют эффективную длину волны, которая находится в диапазоне от 0,6 до 0,7 мкм и уточняется специальными измерениями. λ_e сдвигается в сторону коротких волн при повышении измеряемой температуры. Эти изменения невели-

ки, но могут служить источником дополнительной погрешности измерения.

Для сохранения стабильности калибровки нить пирометрической лампы нагревают только до яркостной температуры, равной 1500 °С. При измерениях более высоких температур яркость объекта ослабляют поглощающим стеклом (см. рис. 9.8), которое устанавливают между объектом и лампой. При этом неослабленная яркость нити лампы сравнивается с ослабленной яркостью объекта:

$$L_{\lambda T_1} = \tau L_{\lambda T_2}, \quad (9.24)$$

где $L_{\lambda T_1}$ — яркость нити пирометрической лампы; $L_{\lambda T_2}$ — яркость объекта; τ — коэффициент пропускания поглощающего стекла; T_1 и T_2 — яркостные температуры нити соответственно лампы и объекта.

Коррекция на поглощающее стекло определяется из закона Вина с учетом

$$(9.24): \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{\lambda_2}{C_2} \ln \frac{1}{\tau} =$$

$= A$, где A — пирометрическое ослабление поглощающего стекла в комбинации с красным светофильтром. Например, при $\tau = 0,03$ (яркость объекта ослабляется примерно в 33 раза) $T_1 = 1400$ °С, $T_2 \leq 2000$ °С. При этом $A = 214$.

В квазимонохроматических пирометрах используют лампы с вольфрамовой нитью, обладающей значительным температурным коэффициентом сопротивления. Таким образом, сила тока через лампу, напряжение на ее зажимах либо электрическое сопротивление нити лампы могут служить мерой ее яркостной температуры. В соответствии с этим в квазимонохроматических пирометрах в качестве показывающего прибора используют амперметр, включенный последовательно с лампой; вольтметр, измеряющий падение напряжения на зажимах лампы; логометр или мост, показания которых зависят от сопротивления лампы. В лабораторных и образцовых пирометрах силу тока в лампе обычно измеряют компенсационным методом. На нижнем пределе измерения сила тока в пирометрической лампе равна примерно половине величины, соответствующей верхнему пределу измерения (1400 °С). В связи с этим в пирометрах применяют амперметры с «подавленным» нулем или дифференциальные амперметры. Аналогичный принцип осуществляется при использовании вольтметров: неиспользованной остается первая треть шкалы. Применение логометра или уравновешенного моста позволяет использовать всю шкалу показывающего прибора. Точность отсчета и измерения значительно повышается при использовании уравновешенного моста.

В схеме визуального квазимонохроматического пирометра (см. рис. 9.8) накал нити пирометрической лампы изменяют в процессе измерения, поэтому он называется пирометром переменного накала. Существуют конструкции, в которых накал лампы при измерении поддерживается постоянным, а варьируется видимая яркость объекта поглощающим клином, расположенным между лампой и объектом

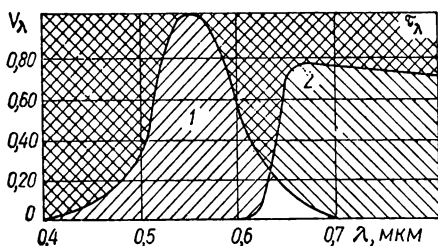


Рис. 9.9. Спектральная чувствительность человеческого глаза:

1 — спектральная чувствительность; 2 — кривая пропускания красного светофильтра.

(рис. 9.10). Поглощающий клин имеет плавно изменяющийся в зависимости от положения клина коэффициент пропускания. При измерении клин, выполняемый, как правило, в форме кольца, поворачивают вокруг оси. Мерой яркостной температуры является угол поворота клина. С клином связана шкала, проградуированная в градусах яркостной температуры объекта. Так же, как в пирометрах с лампой переменного накала, пределы измерения ступенчато расширяют с помощью дополнительных стекол. Пирометры с поглощающим клином и лампой постоянного накала характеризуются меньшей точностью измерения, чем пирометры с лампой переменного накала.

Пирометр ОППИР-017 представляет собой усовершенствованную модификацию пирометра ОППИР-09, отличающуюся более удачной

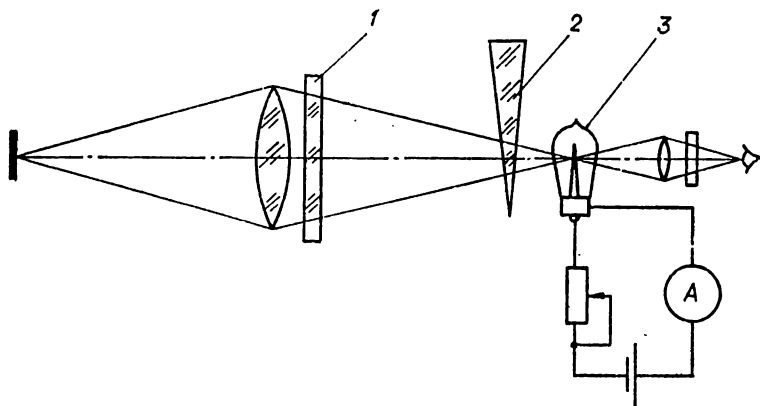


Рис. 9.10. Оптическая схема квазимонохроматического пирометра с поглощающим клином и лампой постоянного накала нити:

1 — стекло; 2 — поглощающий клин; 3 — пирометрическая лампа.

конструкцией дифференциального амперметра, что заметно увеличило эффективную длину шкалы. В конструктивном отношении и эксплуатации эти приборы аналогичны.

Квазимонохроматические визуальные пирометры ОППИР-017 с исчезающей нитью переменного накала и со встроенными показывающими приборами предназначены для измерений температур в широком диапазоне (от 800 до 6000 °C). Существует три модификации пирометров, отличающиеся друг от друга диапазоном измерения. Каждая модификация имеет две шкалы с различными диапазонами измерения. В табл. 9.8 приведены диапазоны измеряемых яркостных температур и допустимые пределы основной погрешности измерения температуры.

Электрическая схема пирометра ОППИР-017 показана на рис. 9.11. Основные элементы и узлы пирометра следующие: оптическая система, состоящая из объектива, окуляра, двух диафрагм, красного светофильтра и поглощающего пурпурного стекла — одного или двух в зависимости от диапазонов измерения; пирометрическая лампа с дугообразной нитью, включенная в электрическую схему последовательно с регулируемым реостатом. В комплект пирометра входят два соединенных последовательно аккумулятора НКН-10 с общим напряжением от 2 до 2,6 В. Аккумуляторы помещаются в сумку, снабженной ремнем для ношения через плечо.

Т а б л и ц а 9.8. Характеристика пирометра ОППИР-917

Модификация пирометра	Шкала	Диапазон измеряемых температур, °С		Пределы основной погрешности, К
		от	до	
I	Первая	800	1400	± 20
	Вторая	1200	2000	± 30
II	Первая	1200	2000	± 30
	Вторая	1800	3200	± 80
III	Первая	1500	2500	± 60
	Вторая	2200	6000	± 250

При наводке пирометра изображение излучателя совмещают с плоскостью нити пирометрической лампы, перемещая тубус с линзой по трубе объектива в пределах 28 мм. Рабочее расстояние от пирометра до излучателя — от 0,7 м до оптической бесконечности. Окулярная система смонтирована в выдвижном тубусе, в котором также установлены выходная диафрагма и красный светофильтр в поворотной обойме. С помощью обоймы красный светофильтр можно выводить из поля зрения при наводке пирометра и вводить при измерении. Пределы перемещения тубуса окуляра обеспечивают четкую наводку на резкость для глаз с диоптрической компенсацией в пределах от -4 до $+6$ диоптрий.

В пирометрах с диапазонами измерения от 800 до 1400 °С и от 1200 до 2000 °С одно поглощающее стекло, которое при измерениях по шкале верхнего предела вводят в поле зрения поворотом рукоятки на 90°. В остальных модификациях с более высокими пределами измерения два поглощающих стекла, одно из которых с большим коэффициентом пропускания вводят в поле зрения при измерениях по шкале нижнего предела, а другое — при измерениях по шкале верхнего предела. На каждой шкале и на рукоятке для поворота обоймы с поглощающими стеклами нанесены цветные точки, позволяющие определить, какое из стекол введено в поле зрения. В конструкции пирометра предусмотрена возможность вывода из поля зрения обоих поглощающих стекол, что требуется при проверке пирометров. Этой же цели служат специальные зажимы, посредством которых пирометрическую лампу можно включить во внешнюю цепь для более точных измерений во время проверок и градуировки. При этом показывающий прибор пирометра и регулировочный реостат отключены.

Пирометрические лампы, используемые в пирометрах ОППИР-017, так же, как в других типах квазимонохроматических пирометров, не

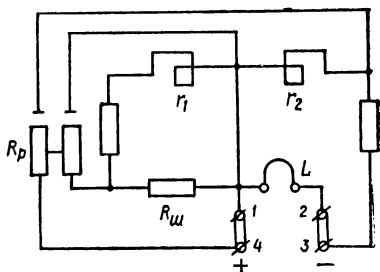


Рис. 9.11. Принципиальная электрическая схема пирометра ОППИР-017:

r_1, r_2 — сопротивления рамок; L — нить пирометрической лампы; R_p — сопротивление реохорда; $R_ш$ — сопротивление шунта; 1, 2 — зажимы для подключения лампы во внешнюю цепь; 3, 4 — зажимы для подключения аккумулятора.

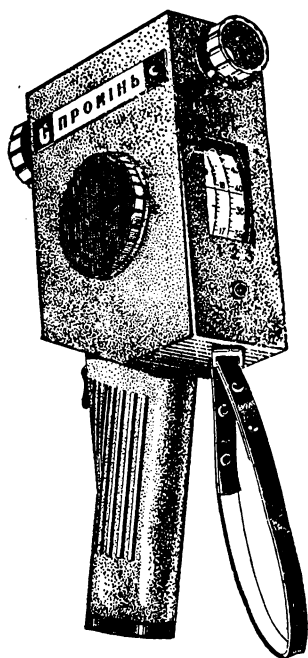


Рис. 9.12. Внешний вид пирометра «Промінь».

прибору. Если в пределах яркости нити оказывается недостаточной, то вводят поглощающее стекло и после уравнивания яркостей показания отсчитывают по шкале верхнего диапазона.

Пирометр «Промінь» имеет трехступенчатый диапазон измерения от 800 до 5000 °С. Он снабжен встроенным источником питания в виде батареи герметичных аккумуляторов и устройством зарядки. Его масса, включая источник питания и зарядное устройство, не превышает 2 кг. Внешний вид пирометра «Промінь» показан на рис. 9.12. Пределы основной допускаемой погрешности и средней квадратичной случайной составляющей основной погрешности измерения температуры пирометром указаны в табл. 9.9.

В пирометре «Промінь» применена экономичная схема преобразования напряжения, снимаемого с реохорда фотометрирования, в ток пирометрической лампы. Реохорд фотометрирования непосредственно связан со шкалами, отградуированными в градусах Цельсия. Полный заряд встроенной батареи аккумуляторов обеспечивает непрерывную работу

взаимозаменяемы. Каждый пирометр ОППИР-017 имеет индивидуальную статическую характеристику. При замене лампы требуется новая калибровка прибора. Сила тока в лампе регулируется кольцевым реостатом, смонтированным в крышке корпуса. При повороте кольца, на котором укреплен движок реостата, против часовой стрелки до упора источник тока отключается, а рамки показывающего прибора замыкаются накоротко. При повороте кольца с движком по часовой стрелке сопротивление реостата плавно выводится, вызывая увеличение силы тока в лампе. В пирометре ОППИР-09 показывающим прибором служит вольтметр, измеряющий напряжение на зажимах лампы.

Порядок работы с пирометром ОППИР-017 следующий: при выведенном красном светофильтре и небольшом накале лампы регулируют положение тубуса окуляра до получения отчетливой видимости нити, затем направляют пирометр на объект измерения и регулированием объектива добиваются резкости изображения объекта в плоскости нити лампы, после этого вводят красный светофильтр и регулировкой тока реостатом уравнивают яркость нити лампы с видимой яркостью объекта и отсчитывают показания по

Таблица 9.9. Характеристика пирометра «Промінь»

Диапазон измеряемых температур, °С		Основная погрешность, К	
		допускаемая	средняя квадратичная случайная составляющая
от	до		
800	1400	14	2,5
1200	2000	20	5,0
1800	5000	150	22,0

пирометра в течение 6 ч при максимальном накале пирометрической лампы. Перемещение окуляра вдоль оптической оси телескопа обеспечивает четкую видимость нити пирометрической лампы для глаза с диоптрической компенсацией зрения в пределах ± 5 диоптрий. Оптическая

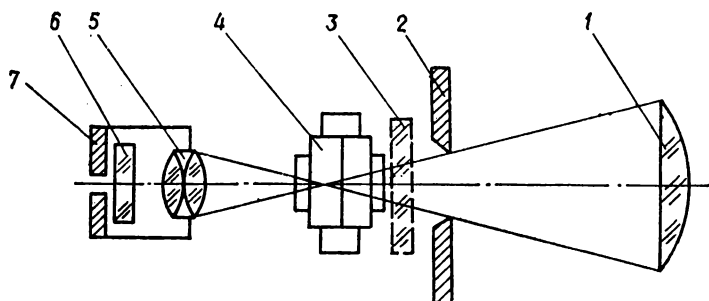


Рис. 9.13. Оптическая схема пирометра «Промінь»:

1 — линза объектива; 2 — диафрагма; 3 — поглощающее стекло; 4 — пирометрические лампочки; 5 — окуляр; 6 — красный светофильтр; 7 — диафрагма.

схема пирометра, показанная на рис. 9.13, обеспечивает резкую видимость предметов, удаленных от переднего среза объективной трубы на расстояние от 0,7 м до оптической бесконечности.

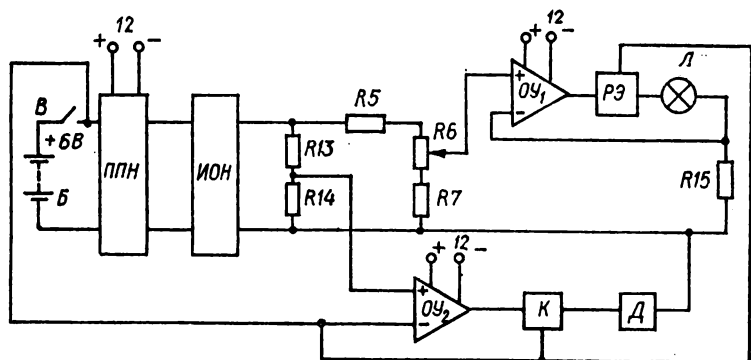


Рис. 9.14. Структурная схема пирометра «Промінь»:

Б — источник питания; В — выключатель питания; ППН — полупроводниковый преобразователь напряжения; ИОН — источник опорного напряжения; R5, R7, R13 — R15 — резисторы; R6 — реохорд фотометрирования; ОУ — операционный усилитель; РЭ — регулирующий элемент; К — ключ транзисторный; Д — светоизлучающий диод; Л — пирометрическая лампа.

Структурная схема пирометра приведена на рис. 9.14. С помощью полупроводникового преобразователя напряжения источник опорного напряжения вырабатывает стабильное напряжение, которое через делители напряжения на резисторах подается на вход преобразователя «напряжение — ток» и компаратор. Преобразователь «напряжение — ток» выполнен на операционном усилителе ОУ₁, нагрузкой

которого служит регулирующий элемент. Последний включен последовательно с пирометрической лампой и резистором обратной связи. Напряжение с реохорда фотометрирования поступает на неинвертирующий вход операционного усилителя ОУ₁, который изменяет со-

Таблица 9.10. Характеристика микропирометров ОМП-054 и ВИМП-015М

Параметр	Тип микропирометра	
	ОМП-054	ВИМП-015М
Диапазон измеряемых температур, °С	800...4000	400...4000
Эффективная длина волны, мкм	0,65±0,01 0,52±0,012 1/3000	0,65±0,01 1,00±0,01 1/3000
Показатель визирования		
Основная допускаемая погрешность (абсолютная величина), К, по поддиапазонам:		
400...850 °С	—	12
800...1400 °С	14	14
1200...2000 °С	20	30
1800...4000 °С	90	90
Средняя квадратичная случайная составляющая основной погрешности (абсолютная величина), К, по поддиапазонам:		
400...850 °С	—	5
800...1400 °С	2,5	2,5
1200...2000 °С	5	5
1800...4000 °С	20	20
Минимальный размер объекта, мм	0,05	0,1

противление регулирующего элемента так, чтобы напряжение на инвертирующем входе равнялось входному. Таким образом, каждому положению движка реохорда фотометрирования соответствует строго определенный ток пирометрической лампы.

Для аккумуляторной батареи не допустим разряд ниже определенного уровня. Поэтому в схему пирометра введен сигнализатор разряда батареи питания, который

Таблица 9.11. Характеристика прецизионного пирометра ЭОП-36

Диапазон измеряемых температур, °С		Средняя квадратичная случайная составляющая основной погрешности, К (абсолютная величина)
от	до	
900	1400	2,5
1400	2000	4
2000	3000	6
3000	6000	12
6000	10000	30

представляет собой компаратор напряжения на операционном усилителе ОУ₂, управляющем проводимостью ключа. Компаратор уравнивает стабильное напряжение 5 В, поступающее с источника опорного напряжения, и напряжение питания пирометра. При разряде батареи питания ниже 5 В на выходе компаратора появляется напряжение, открывающее транзисторный ключ, и на лицевой панели прибора загорается светоизлучающий диод. Для дальнейшей работы с прибором необходимо заменить ак-

кумуляторную батарею. Работа с прибором при светящемся светодиоде недопустима.

Микропирометры ОМП-С54 и ВИМП-015М (табл. 9.10, рис. 9.15) предназначены для измерения яркостной температуры объектов малых размеров. Это настольные приборы, приспособленные для работы в лабораториях, на испытательных стендах и чистых цехах. Их оптическая система обеспечивает 20-кратное увеличение получаемого в плоскости нити лампы изображения объекта. Микропирометры имеют встроенные электроизмерительные приборы. Они также могут работать в комплекте с выносными приборами повышенной точности.

При измерении температуры в диапазоне от 400 до 850 °С микропирометр ВИМП-015М работает в комплекте с электронно-оптическим преобразователем, преобразующим инфракрасное излучение тела в видимое. Напряжение питания на преобразователь подается от высоковольтного блока питания.

Прецизионный оптический пирометр ЭОП-66 (табл. 9.11) применяется в метрологических определениях в качестве образцового средства первого разряда, а также в научных и технологических исследованиях, требующих высокой точности измерений. Оптико-механическая система пирометра имеет большую светосилу и обеспечивает четкое визуирование объектов, расположенных перед объективом пирометра на расстоянии от 0,7 м до оптической бесконечности. Размеры объекта, который находится на расстоянии 700—1000 мм от пирометра, не должны быть менее $1 \times 1 \text{ мм}^2$. Красные светофильтры, предназначенные для монохроматизации светового потока, обеспечивают $\lambda_s = 0,65 \pm 0,01 \text{ мкм}$.

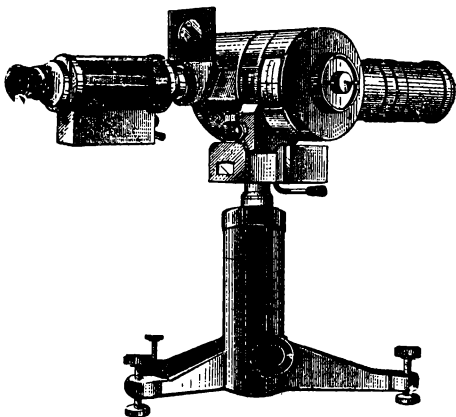


Рис. 9.15. Внешний вид микропирометра ВИМП-015М.

9.6. Агрегатный комплекс стационарных пирометрических преобразователей

Агрегатный комплекс стационарных ПП (АПИР-С) представляет собой совокупность первичных ПП, измерительных ПВ и необходимых для обеспечения их работы вспомогательных устройств, объединенных в унифицированные параметрические ряды ПП Государственной системы приборов. Основным принципом построения разработанной номенклатуры комплекса АПИР-С является создание пирометров различных типов (полного излучения, частичного излучения и спектрального отношения) на единой конструктивной основе. Правильный выбор схемных и конструктивных решений позволяет обеспечивать постоянное улучшение характеристик пирометров, входящих в комплекс, переход от мелкосерийного выпуска отдельных типов пирометров к серийному выпуску типовых узлов ограниченного параметриче-

ского ряда, которые в зависимости от их сочетания, делают возможным создание различных типов пирометров, предназначенных для измерения в различных отраслях промышленности. Средства измерения АПИР-С предназначены как для комплектования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП), так и для создания локальных установок и систем измерения, контроля и регулирования температуры методами пирометрии.

Общая структура комплекса АПИР-С и его связь с другими агрегатными системами ГСП представлена на рис. 9.16. В комплекс входят следующие группы изделий: ПП, представляющие собой устройства непосредственного преобразования энергии теплового электромагнитного излучения в электрический сигнал; измерительные ПВ

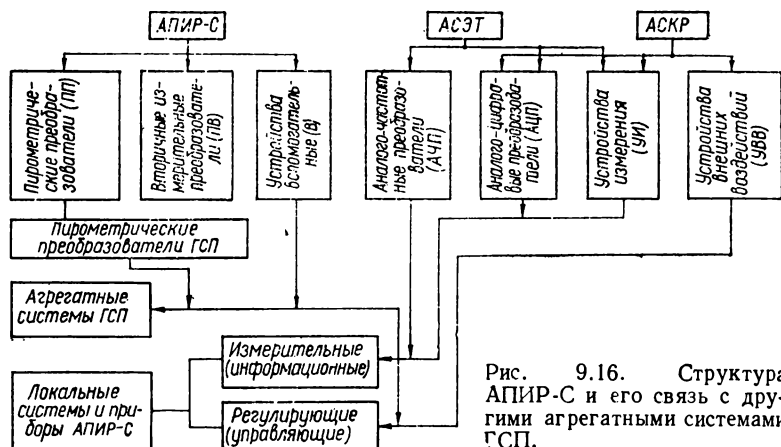


Рис. 9.16. Структура АПИР-С и его связь с другими агрегатными системами ГСП.

представляющие собой устройства преобразования сигнала ПП в унифицированные сигналы ГСП; вспомогательные устройства для обеспечения монтажа и работоспособности ПП в процессе эксплуатации.

В зависимости от спектральной чувствительности ПП подразделяются на преобразователи полного и частичного излучения и спектрального отношения; по типу используемого приемника излучения — на термоэлектрические, фотодиодные, фотоэлементные, болометрические, фоторезисторные, пироэлектрические и фотоумножительные; по конструктивному исполнению корпуса — на цилиндрические диаметром 13, 25, 50, 100, 125 мм и прямоугольные с размером поперечного сечения корпуса 100×170 мм. Оптическая система, применяемая в ПП, — линзовая (сферическая) и зеркальная. В зависимости от диапазона измерения температуры, показателя визирования, рабочего спектрального диапазона, номинальной статической характеристики и других признаков выпускаются ПП различных модификаций, обозначение которых (рис. 9.17) указывается в технических условиях.

Измерительные ПВ классифицируются по конструктивному исполнению, виду входного и выходного сигналов, функциональному назначению и модификации. По виду входного сигнала ПВ подразделяются в зависимости от типа ПП, в комплекте с которым они работают; по выходному сигналу — на ПВ с токовым сигналом постоянного тока 0...5 мА или 4...20 мА; ПВ с сигналом напряжения постоянного тока 0...100 мВ или 0...10 В. По функциональному назначению —

на ПВ с запоминанием или без запоминания максимального значения измеряемой температуры; ПВ с линеаризацией или без линеаризации выходного сигнала; ПВ со встроенным показывающим прибором или без него.

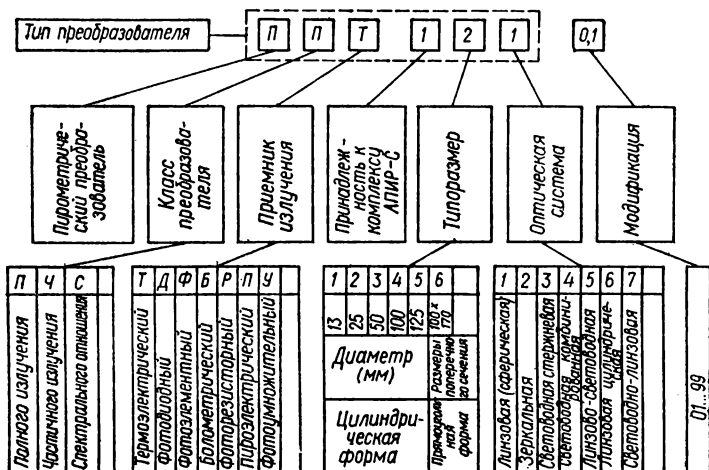


Рис. 9.17. Условное обозначение ПП.

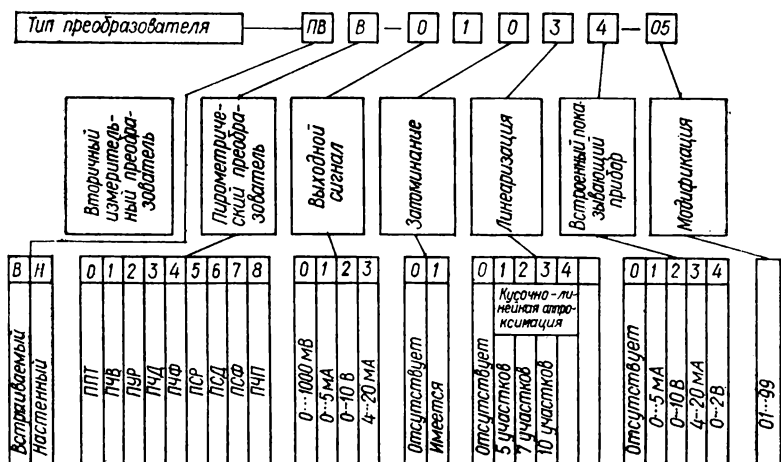


Рис. 9.18. Условное обозначение измерительных ПВ.

В зависимости от измеряемого температурного диапазона, номинальной статической характеристики и других отличительных признаков измерительные ПВ выпускаются различных модификаций, обозначение которых (рис. 9.18) указывается в технических условиях.

В состав измерительных ПВ входят блоки промежуточного преобразователя, выходного усилителя (БУ), линейризации (функциональный БФ), индикации (БИ), запоминания (БЗ), питания (БП), а также устройства калибровки и поверки, устройства обеспечения требуемого температурного режима приемников излучения, устройства коррективы на излучательную способность, сигнализаторы уровня яркости и др. К вспомогательным устройствам относятся устройства крепления и наведения ПП (подставки, штативы, поворотные головки, установочные фланцы и визирные трубки), а также устройства защиты ПП (устройства охлаждения и обдува, защитные козырьки и заслонки).

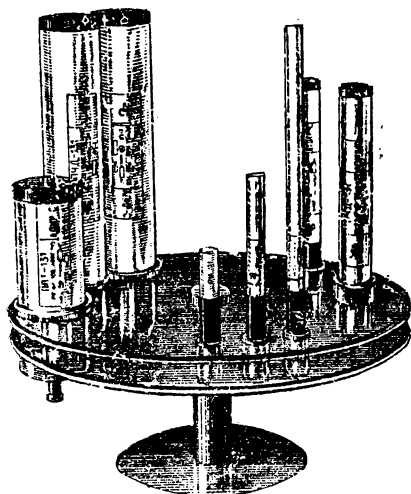


Рис. 9.19. Внешний вид ПП полного и частичного излучения.

По принципу использования теплового потока излучения объекта ПП комплекса АПИР-С делятся на преобразователи без модуляции потока излучения и с модуляцией потока.

ПП без модуляции потока излучения выпускаются двух типов: полного излучения термоэлектрические (ППТ) и частичного излучения фотодиодные (ПЧД) (рис. 9.19). В преобразователях ППТ в качестве приемника излучения используется хромель-копелевая термобатарея из фольги. Для уменьшения погрешности, вызванной воздействием окружающей температуры, предусмотрена температурная компенсация. В преобразователях ПЧД в качестве приемника излучения используются германиевый (для номинальной статической характеристики

ДГ) и кремниевый (для номинальной статической характеристики ДК) фотодиоды. В преобразователях ПЧД-121 и ПЧД-131 фотодиоды микротермостатированы.

Преобразователи ППТ-131, ППТ-142 и ПЧД-131 имеют визирное устройство для наводки их на объект; в ПЧД-111, ПЧД-121 и ППТ-121 наводка на объект осуществляется с помощью визирных устройств, входящих в состав монтажного комплекта. Номинальное рабочее расстояние от пирометра до измеряемого объекта — 1 м. Рабочий спектральный диапазон преобразователей ПЧД определяется типом светофильтра и фотодиода, а ППТ — материалом оптической системы (флюорит, кварц, стекло марки К8). В преобразователях ППТ-142 оптическая система зеркальная, зеркало от загрязнения защищается лавсановой пленкой.

Пирометрические преобразователи с модуляцией потока излучения подразделяются на преобразователи частичного излучения (ПЧР, ПЧФ, ПЧП), входящие в состав пирометров «Смотрич-1, 2, 3», и преобразователи спектрального отношения (ПСР, ПСД и ПСФ), входящие в состав пирометров «Веселка-4, 5, 6» (рис. 9.20). В указанных преобразователях в качестве приемников излучения используются вакуумные мультищелочные фотоэлементы, фоторезисторы на основе селенида свинца

и сульфида свинца и пирозлектрический приемник излучения. Фото-резисторы и пирозлектрический приемник микротермостатированы. Рабочие спектральные диапазоны определяются типами обычных или интерференционных светофильтров. Модуляция потока излучения осуществляется механическим обтюратором, вращаемым синфазным микродвигателем. Наводка на объект измерения проводится с помощью визирной системы. Рабочее расстояние от пирометра до измеряемого объекта — от 0,35 м до оптической бесконечности. В ПП частичного излучения и спектрального отношения используются объективы, скорректированные в различных спектральных участках (от 0,3 до 14 мкм).

Измерительные ПВ и промежуточные преобразователи (ППЧ и ППС). ПВ классифицируют по характеру входного сигнала, который определяется модификацией ПП и его номинальной статической характеристикой; по наличию или отсутствию блоков запоминания макси-

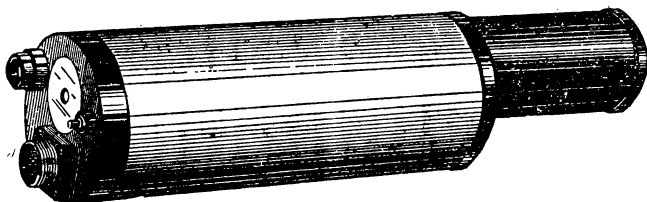


Рис. 9.20. Внешний вид ПП «Смотрич» и «Веселка».

мальной измеряемой температуры, линеаризации и встроенного отсчетного устройства. В зависимости от состава используемых функциональных блоков ПВ имеют два конструктивных исполнения: трех-блочное и шестиблочное.

ПП с модуляцией потока излучения пирометров «Веселка-4, 5, 6» и «Смотрич-1, 2, 3» кроме измерительных ПВ имеют ППЧ и ППС, выполненные в виде отдельных средств и предназначенные для усиления выходного сигнала ПП до 1 В.

Первичные ПП подключаются к ПВ с помощью унифицированных разъемов. ППЧ, ППС и измерительные ПВ выполнены на конструктивах приборной части УТК. Функциональные съемные блоки размещены в прямоугольных каркасах встроенного исполнения.

Принципиальные электрические и блок-схемы пирометров комплекса АПИР-С. ПП полного излучения без модуляции потока излучения (ППТ-121, ППТ-131 и ППТ-142) работают в комплекте с ПВ типа ПВ-0. Подключение первичных преобразователей в измерительную схему производится с помощью разъемов типа РС-4. Электрические принципиальные схемы первичных преобразователей приведены на рис. 9.21—9.23.

ПП частичного излучения (ПЧД-111, ПЧД-121 и ПЧД-131) без модуляции потока излучения работают в комплекте с ПВ типа ПВ-3. Электрическая принципиальная схема перечисленных преобразователей приведена на рис. 9.24.

ПП и пирометры частичного излучения «Смотрич-1, 2, 3» выпускаются в исполнениях согласно блок-схемам (рис. 9.25). Принцип их действия основан на зависимости энергетической яркости излучения объекта в ограниченном участке длин волн от его температуры. Блок-схема пирометра приведена на рис. 9.26. С помощью оптической системы поток излучения от участка поверхности нагретого тела, темпе-

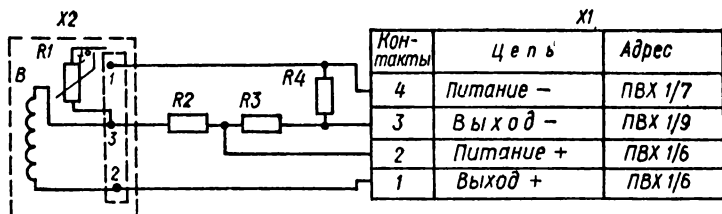


Рис. 9.21. Принципиальная электрическая схема ПП полного излучения ППТ-131 и ППТ-131-01:

R1 — катушка медная 20 Ом; В — термобатарея; R2, R3, R4 — катушки манганиновые 20 Ом; X1 — вилка РС-4; X2 — колодка.

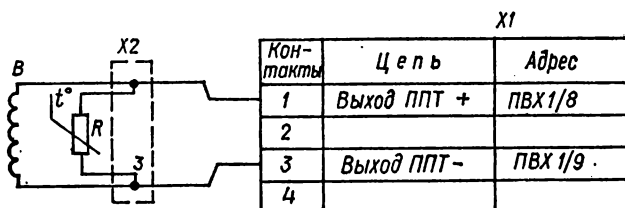


Рис. 9.22. Принципиальная электрическая схема ПП полного излучения ППТ-121 и ППТ-131-03 (05; 07; 08):

R — катушка медная (от 40 до 25 Ом в зависимости от модификации); В — термобатарея; X1 — вилка РС-4; X2 — колодка.

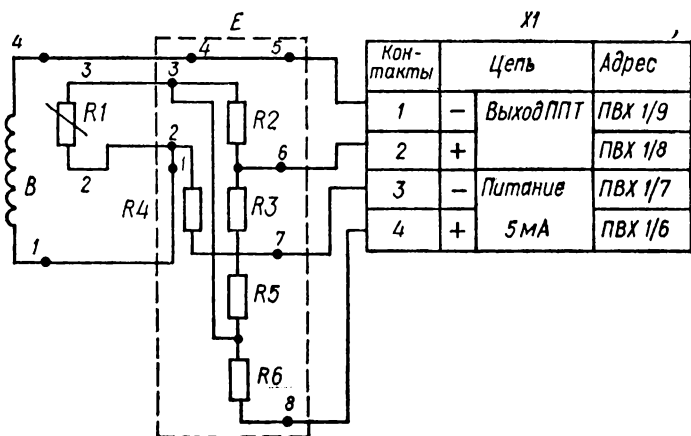


Рис. 9.23. Принципиальная электрическая схема ПП полного излучения ППТ-142.

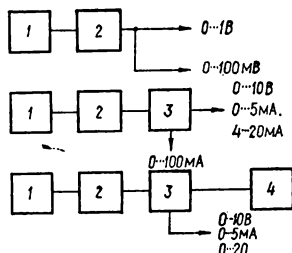
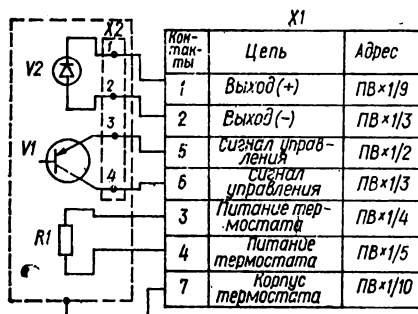


Рис. 9.24. Принципиальная электрическая схема ПЧД-121 и ПЧД-131: V1 — транзистор ГТЗ10А; V2 — фотодиод; R1 — катушка; X1 — вилка РС-7; X2 — колодка.

Рис. 9.25. Блок-схема ПП и пирометров «Смотрич-1», «Смотрич-2» и «Смотрич-3»:

1 — ПП; 2 — промежуточный преобразователь; 3 — измерительный ПВ; 4 — электронный самопишущий потенциометр.

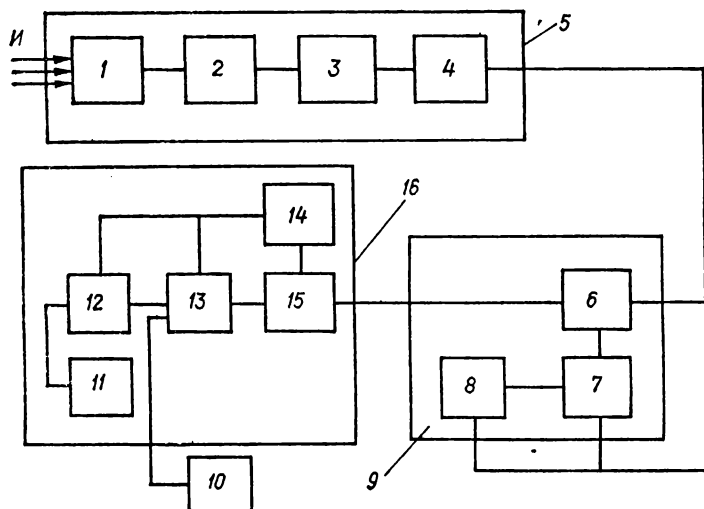


Рис. 9.26. Блок-схема пирометра «Смотрич»:

И — излучение от объекта; 1 — оптическая система; 2 — модулятор; 3 — приемник излучения; 4 — предусилитель; 5 — пирометрический преобразователь; 6 — измерительный преобразователь; 7 — блок питания БП-4; 8 — блок питания БП-3; 9 — промежуточный преобразователь; 10 — электронный автоматический самопишущий потенциометр; 11 — блок индикации БИ; 12 — блок выходного усилителя БУ; 13 — блок функциональный БФ; 14 — блок питания БП; 15 — блок запоминания; 16 — измерительный преобразователь ПВ-1.

ратуру которого необходимо контролировать, модулируется и направляется на приемник излучения первичного ПП. Приемник излучения служит для преобразования импульсов потока излучения в пропорциональные им импульсы напряжения. С нагрузки приемника излучения импульсы напряжения поступают на вход предусилителя. Предварительно усиленные импульсы поступают на вход промежуточного

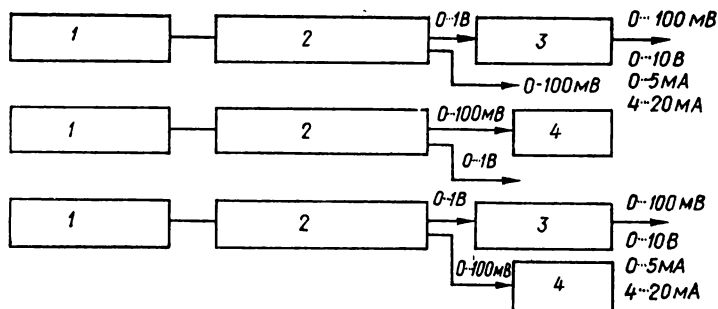


Рис. 9.27. Блок-схема ПП и пирометров «Веселка-4», «Веселка-5», «Веселка-6»:

1 — ПП; 2 — промежуточный преобразователь; 3 — преобразователь измерительный ПВ-2; 4 — электронный самопишущий потенциометр.

преобразователя, преобразующего импульсы в сигнал постоянного тока 0—1 В. Измерительный преобразователь ПВ-1 преобразует нелинейный сигнал 0,1...1 В в унифицированные линейные выходные сигналы ГСП: 0—5 мА, 4...20 мА и 0...10 В и обеспечивает возмож-

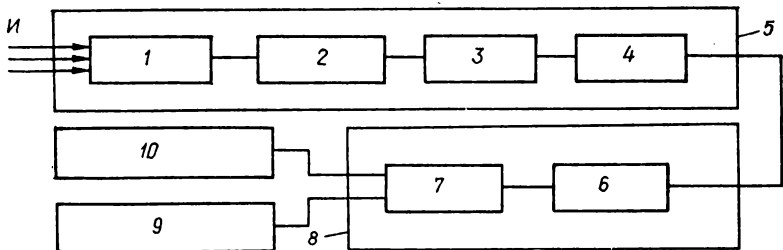


Рис. 9.28. Блок-схема пирометра «Веселка»:

И — излучение от объекта; 1 — оптическая система; 2 — модулятор; 3 — приемник излучения; 4 — предусилитель; 5 — ПП; 6 — блок нормирования; 7 — блок логарифмирования; 8 — промежуточный преобразователь; 9 — электронный автоматический самопишущий потенциометр; 10 — измерительный преобразователь ПВ-2.

ность запоминания максимальной измеряемой температуры. Одновременно выход измерительного преобразователя 0...100 мВ может быть подключен к электрическому автоматическому самопишущему потенциометру.

ПП и пирометры спектрального отношения «Веселка-4, 5, 6» выпускаются в исполнениях согласно блок-схемам (рис. 9.27). Принцип их действия основан на зависимости отношения интенсивности излучения в двух участках спектра излучения объекта от его температуры.

С помощью оптической системы (рис. 9.28) поток излучения от участка поверхности нагретого тела, температуру которого необходимо контролировать, направляется через модулятор на приемник излучения первичного ПП. Приемник излучения служит для преобразования импульсов яркости монохроматических излучений $L(\lambda_1 T)$, $L(\lambda_2 T)$ в пропорциональные им импульсы напряжения U_1 и U_2 практически прямоугольной формы. С нагрузки приемного элемента импульсы напряжения U_1 и U_2 поступают на вход предварительного усилителя. Последний служит для усиления как по амплитуде, так и по мощности импульсов напряжения U_1 и U_2 .

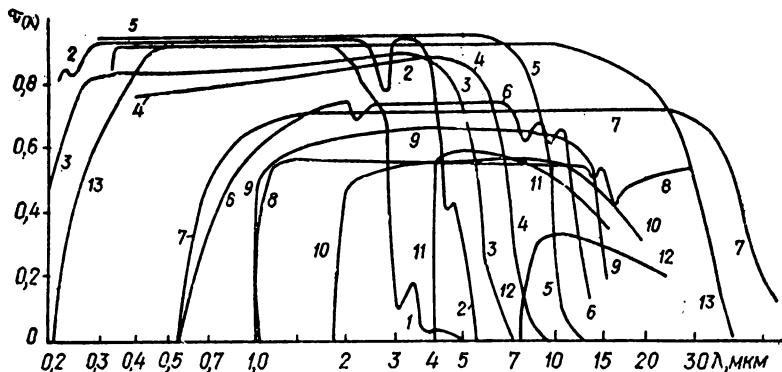


Рис. 9.29. Зависимость коэффициента пропускания $\tau(\lambda)$ различных материалов для линз, окошек и фильтров от длины волны:

1 — оптическое стекло толщиной 2 мм, $\lambda = 0,35 \dots 2,9$; 2 — плавленный кварц (SiO_2) толщиной 1 мм, $\lambda = 0,3 \dots 4,5$; 3 — сапфир (Al_2O_3) толщиной 2,5 мм, $\lambda = 0,25 \dots 5,5$; 4 — фтористый литий (LiF_2) толщиной 2,5 мм, $\lambda = 0,3 \dots 7$; 5 — флюорит (CaF_2) толщиной 2 мм, $\lambda = 0,3 \dots 10$; 6 — сервофракс (As_2S_3) толщиной 2 мм, $\lambda = 0,6 \dots 12$; 7 — KRS5 (TlBr или TlI, твердый раствор), $\lambda = 0,6 \dots 40$; 8 — кремний толщиной 2,5 мм, $\lambda = 1 \dots 15$; 9 — фосфид индия (InP), $\lambda = 1 \dots 14$; 10 — германий толщиной 2 мм, $\lambda = 2 \dots 20$; 11 — арсенид индия (InAs), $\lambda = 4 \dots 15$; 12 — антимонид индия (InSb), $\lambda = 8 \dots 25$; 13 — бромистый калий (KBr) толщиной 10 мм, $\lambda = 0,25 \dots 40$.

Эта ступень усиления необходима для уменьшения возможности прохождения шумов из первичного ПП на вход промежуточного преобразователя, в котором импульсы поступают на вход блока нормирования, а с выхода последнего — на вход блока логарифмирования. Блок

логарифмирования реализует передаточную функцию
$$U_{\text{вых}} = \frac{A}{\ln \frac{U_1}{U_2} + B} + C$$

и обеспечивает линейный выходной сигнал 0—1 В, который поступает на вход измерительного преобразователя (ПВ-2). Через делитель напряжения линейный выходной сигнал 0...100 мВ используется для подключения к потенциометру типа КСП2. Измерительный преобразователь преобразует линейный сигнал 0...1 В в унифицированные выходные сигналы ГСП: 0...5 мА, 4...20 мА, 0...10 В и обеспечивает возможность запоминания максимальной измеряемой температуры.

Оптические элементы и приемники излучения комплекса АПИР-С. Оптическая система, применяемая в ПП комплекса АПИР-С, в основном линзовая; только у преобразователя полного излучения типа ППТ-142 — зеркальная.

Линзы ПП, применяемых для измерения температуры выше 800 °С, изготовляют из стекла марки К8, пропускающего излучение от 0,4 до 2,5 мкм; линзы ПП, применяемых для измерения температуры выше 400 °С, — из кварца марки КИ, пропускающего излучение от 0,4 до 4 мкм; линзы ПП, применяемых для измерения температуры от 50 °С, изготовляют из флюорита и защищают лавсановой пленкой, которая, как и флюорит, пропускает излучение в диапазоне от 0,4 до 14 мкм.

На рис. 9.29 показаны зависимости коэффициента пропускания различных материалов от длины волны. С помощью специального напыленного просветляющего слоя можно уменьшить отражение от линз и тем самым повысить их пропускание. Для предохранения

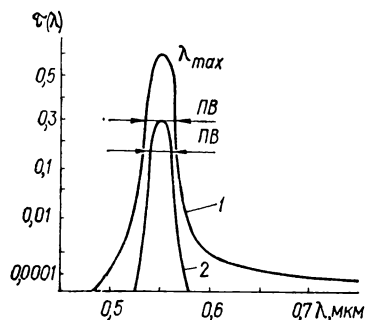


Рис. 9.30. Зависимость коэффициента пропускания интерференционного полосового фильтра (1) и двойного полосового фильтра (2) от длины волны ($\lambda_{\text{макс}} = 0,55$ мкм; ПВ — полуширина полосы пропускания фильтра).

линз или зеркал от загрязнения и химического воздействия, а также для исключения погрешности измерения рефлекторных пирометров (ППТ-142), возникающей в результате воздействия на приемник излучения потоков воздуха, входные отверстия ПП закрывают прозрачными окнами. Интерференционный фильтр характеризуется узкой полосой пропускания, которая может практически располагаться в любой части спектра — от видимой до инфракрасной. Он представляет собой последовательно напыленный на стеклянную полированную поверхность металлический полупрозрачный слой, прозрачный промежуточный слой из неметалла (кварц, криолит, флюорит) и металлический слой. Вместо металлического слоя могут быть использованы слои из веществ с большим коэффициентом преломления, например из двуокиси титана или сульфида мышьяка. Напыленные слои закрываются еще одним защитным стеклом. При склеивании двух одинаковых фильтров получают двойной фильтр. Такие фильтры обладают почти постоянным коэффициентом пропускания в очень узкой полосе волн (рис. 9.30). Основными характеристиками интерференционных фильтров являются длина волны максимума пропускания, максимальный коэффициент пропускания и ширина половины полосы пропускания фильтра, при которой коэффициент пропускания равен $\tau_{\text{макс}}/2$ — мере спектральной ширины полосы пропускания фильтра.

В качестве тепловых приемников излучения используются термобатареи и болометры. Они достаточно чувствительны во всем инфракрасном диапазоне длин волн (от 0,75 до 1000 мкм) независимо от длины волны излучения. Недостатком их является относительно большая инерционность.

В фотоэлектрических приемниках поглощенная фотоэлементом энергия излучения вследствие внешнего фотоэлектрического эффекта выбивает электроны в окружающее пространство. У фоторезисторов, фотодиодов и фототранзисторов, благодаря внутреннему фотоэффекту, связанные в кристаллической решетке электроны переходят на более высокий энергетический уровень. При этом изменяется проводимость

всего элемента или переходного слоя без какого-либо изменения температуры приемника излучения. Фотоэлектрические приемники излучения характеризуются высокой чувствительностью к излучению, добротностью, быстродействием и избирательностью. По относительной спектральной чувствительности проводится сравнение приемников излучения различных типов (рис. 9.31). В табл. 9.12 представлены основные характеристики тепловых фотоэлектронных приемников излучения.

Технические характеристики пирометров комплекса АПИР-С. ПП и пирометры комплекса АПИР-С предназначены для бесконтактного измерения или регулирования температуры тел по их излучению в диапазоне температур от 30 до 3500 °С. Основные их технические характеристики приведены в табл. 9.13—9.16, а их номинальные статические характеристики преобразования — в табл. 9.17—9.21. Внешний вид ПП с модуляцией потока излучения («Веселка» или «Смотрич») показан на рис. 9.32. Внешний вид пирометров с модуляцией потока излучения показан на рис. 9.33.

Блок запоминания максимальной температуры. Малая инерционность пирометров с фотоэлектронными приемниками приводит к значительным колебаниям показаний измерительного прибора. Часто при контроле и регулировании температуры в технологических процессах необходимо знать максимальную температуру, возникающую при ее изменениях, например, при изменении температуры объектов, периодически исчезающих из поля зре-

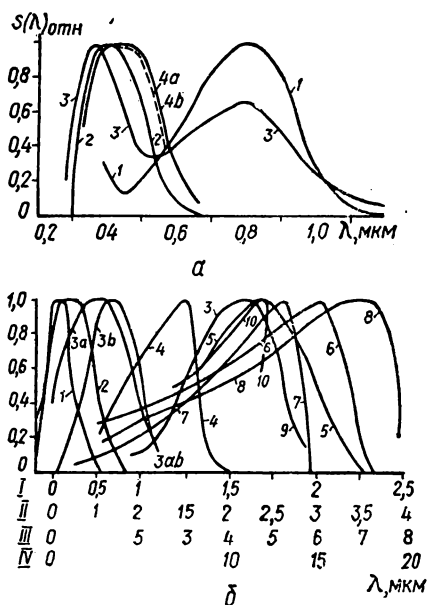


Рис. 9.31. Зависимость относительной спектральной чувствительности $S(\lambda)_{\text{отн}} = S(\lambda)/S(\lambda)_{\text{макс}}$ фотоэлектрических приемников излучения от длины волны:

а — приемники излучения с внешним фотоэффектом: 1 — фотоэлемент с катодом из оксида цезия, $\lambda_{\text{макс}} = 0,7...0,9$; 2 — фотоэлемент с катодом из антимонида цезия ($S = 4$), $\lambda_{\text{макс}} = 0,35...0,45$; 3 — фотоумножитель при $\lambda_{\text{макс}} = 0,38$; 0,08; 4 — фотоумножитель при 22 °С, $\lambda_{\text{макс}} = 0,38...0,50$; 5 — фотоумножитель при -55 °С, $\lambda_{\text{макс}} = 0,38...0,47$; 6 — приемники излучения с внутренним фотоэффектом: 1 — селеновый фотоэлемент, I, $\lambda_{\text{макс}} = 0,55...0,63$ мкм; 2 — фоторезистор CdS, I, $\lambda_{\text{макс}} = 0,51...0,64$ мкм; 3 — кремниевый фотоэлемент, I, $\lambda_{\text{макс}} = 0,5...1,0$ мкм, большой p-слой, I, $\lambda_{\text{макс}} = 0,8...1,1$ мкм; 4 — германиевый фотоэлемент, II, $\lambda_{\text{макс}} = 1,4...1,55$ мкм; 5 — фотоэлемент PbS, II, $\lambda_{\text{макс}} = 2,0...2,5$ мкм; 6 — фотоэлемент InSb (при 20 °С), III, $\lambda_{\text{макс}} = 6,0...6,3$ мкм; 7 — фотоэлемент InSb (77 K), III, $\lambda_{\text{макс}} = 6,3$ мкм; 8 — фотоэлемент InAs (при 20 °С), II, $\lambda_{\text{макс}} = 3,2...3,6$ мкм; 9 — фотоэлемент из германия, легированного ртутью, IV, $\lambda_{\text{макс}} = 10...12$ мкм; 10 — фоторезистор PbSn—Te (при 77 K), IV, $\lambda_{\text{макс}} = 12$ мкм.

Т а б л и ц а 9.12. Характеристики приемников излучения

Наименование и тип	Вид	Область спектральной чувствительности, мкм	Площадь приемной площадки, мм ²	Диапазон измеряемых температур, °С	
				от	до
Фольговая термобатарея	Т	0,4...25	Ø 3 мм	—60	+100
Германиевый фотодиод ФД-3А	Ф	0,4...2 $\lambda_{\max} = 1,4$	2	—60	+60
Кремниевый фотодиод	Ф	0,4...1,3 $\lambda_{\max} = 0,9$	—	—60	+60
Фоторезистор ФР-СС-138 (на основе сульфида свинца с германиевым окном)	Ф	1,8...3,0 $\lambda_{\max} = 2,2$	9	—60	+60 (Кратковременно)
Фоторезистор СФИ-12 (на основе селенида свинца с иммерсионной линзой)	Ф	2,5...4,0 $\lambda_{\max} = 3,6 \pm 0,3$	2	—60	+35
Пирозлектрический приемник МГ-30	Т	2...20 с германиевым окном 8—14	1	—45	+55
Мультищелочной вакуумный фотоэлемент Ф15	Ф	0,36...0,85 $\lambda_{\max} = 0,43$	Ø 15 мм	+10	+50
Маломшумящий германиевый фотодиод ФД-93-111	Ф	0,4...2,0 $\lambda_{\max} = 1,4$	1	—60	+50
Вакуумный фоторезистор ФСВ/16АН на основе сульфида свинца	Ф	1,0...3,2 $\lambda_{\max} = 2,5$	16	—	+40

П р и м е ч а н и е. Ф — фотозлектрический; Т — тепловой.

Темновой ток I_T , мкА, или темновое сопротивление R_T , МОм	Порог чувствительности, Вт ($\text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2} / \text{т} \cdot \text{мм}^{-1}$)	Чувствительность (K , f или λ)	Постоянная времени, с	Напряжение шумов, мкВ
—	—	0,1 В/Вт	0,4	—
$I_T \leq 10$; при $t = 60^\circ \text{C}$ $I_T \leq 65$	—	Интегральная: $\geq 3,74 \text{ мА/лм}$ $\geq 3,74 \cdot 10^{-2} \text{ мкА/лк}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	—
$I_T \leq 1$; при $t = 80^\circ \text{C}$ $I_T \leq 2$	—	Интегральная: $8 \cdot 10^{-3} \text{ мкА/лк}$	—	—
$0,05 \leq R_T \leq 1,5$	$\leq 1,3 \cdot 10^{-10}$; при $f = 400 \text{ Гц}$ $\Delta f = 1 \text{ Гц}$	$\leq 1700 \text{ В/Вт}$ при $f = 400 \text{ Гц}$, $t = 300^\circ \text{C}$	$(0,2-0,3) \times 10^{-3}$	2
$0,03 \leq R_T \leq 0,4$	—	$\leq 300 \text{ В/Вт}$ при $f = 1200 \text{ Гц}$, $T = 300 \text{ К}$	$30 \cdot 10^{-6}$	—
$R_{\text{вых}} = 50 \text{ Ом}$	$\leq 3 \cdot 10^{-9}$; при $t = 300^\circ \text{C}$, $f = 400 \text{ Гц}$ $\Delta f = 1 \text{ Гц}$	$\leq 1000 \text{ В/Вт}$ при $f = 250 \text{ Гц}$, $t = 300^\circ \text{C}$	—	—
$I_T \leq 10^{-4}$	—	150 мкА/лм	—	—
$I_T \leq 10$; при $t = 50^\circ \text{C}$ $I_T \leq 80$	—	$\geq 17 \text{ мкА/лм}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	—
$R_T = 5$	$1 \cdot 10^{-8}$ при 300°C	500 В/Вт	—	5

Таблица 9.13. Характеристики ПП и пирометров полного излучения

ППТ							
Диапазон измеряемых температур, °С		Номинальная статическая характеристика	Рабочий спектральный диапазон, мкм		Тип, модификация	Показатель визирования	Тип, модификация
от	до		от	до			
100	400	РФ-4А	0,4	8	—	—	ППТ-131
300	600	РФ-6А	0,4	8	—	—	ППТ-131-01
400	1500	РК-15А	0,4	4	ППТ-121	1 : 25	ППТ-131-03
900	2000	РК-20А	0,4	4	ППТ-121-01	1 : 50	ППТ-131-05
1400	2500	РС-25А	0,4	2,5	ППТ-121-02	1 : 50	ППТ-131-07
30	300	Р-3	0,4	14	—	—	—

Таблица 9.14. Характеристики ПП и пирометров частичного излу

ПЧД							
Диапазон измеряемых температур, °С		Номинальная статическая характеристика	Рабочий спектральный диапазон, мм		Тип, модификация	Показатель визирования	Тип, модификация
от	до		от	до			
800	1300	ДК-13	0,7	1,1	ПЧД-111	1 : 25	ПЧД-121
1000	2000	ДК-20	0,7	1,1	ПЧД-111-01	1 : 50	ПЧД-121-01
1500	2500	ДК-25	0,7	1,1	ПЧД-111-02	1 : 100	ПЧД-121-02
450	750	ДГ-7,5	0,8	1,8	—	—	ПЧД-121-03
700	1100	ДГ-11	0,8	1,8	ПЧД-111-03	1 : 25	ПЧД-121-04
600	1300	ДГ-13	0,8	1,8	ПЧД-111-04	1 : 50	ПЧД-121-05
1100	1700	ДГ-17	0,8	1,8	ПЧД-111-05	1 : 100	ПЧД-121-06

без модуляции потока

			ПВ-0			Система ППТ + ПВ-0	
Показатель визирования	Тип, модификация	Показатель визирования	Номинальная статическая характеристика	Диапазон измеряемой температуры, °С		Основная погрешность, %	Быстродействие, с
				от	до		
1 : 15	—	—	РФ-4А-1	100	400	2,0	2,0
1 : 25	—	—	РФ-6А-1	300	600	2,0	
			РК-15А-1	400	1000		
1 : 50	—	—	РК-15А-2	600	1200	1,5	
			РК-15А-3	700	1500		
1 : 100	—	—	РК-20А-1	900	1800	1,5	
			РК-20А-2	1000	2000		
1 : 100	—	—	РС-25А-1	1400	2500	1,5	
—	ППТ-142	1 : 5	Р-3-1	30	100		
			Р-3-2	50	200	2,0	
			Р-3-3	100	300		

чения без модуляции потока

			ПВ-3			Система ПЧД + ПВ-3	
Показатель визирования	Тип, модификация	Показатель визирования	Номинальная статическая характеристика	Диапазон измеряемой температуры, °С		Основная погрешность, %	Быстродействие, с
				от	до		
1 : 50	ПЧД-131	1 : 100	ДК-13-1	800	1300	1,5	0,1
			ДК-20-1	1000	1600	1,5	
1 : 100	ПЧД-131-01	1 : 200	ДК-20-2	1100	2000	1,0	
			ДК-25-1	1500	2200	1,0	
1 : 200	ПЧД-131-02	1 : 300	ДК-25-2	2000	2500	1,5	
1 : 25	ПЧД-131-03	1 : 50	ДГ-75-1	450	750	1,5	
1 : 50	ПЧД-131-04	1 : 100	ДГ-11-1	700	1100	1,0	
1 : 100	ПЧД-131-05	1 : 200	ДГ-13-1	600	1300	1,5	
1 : 200	ПЧД-131-06	1 : 300	ДГ-17-1	1100	1700	1,0	

Таблица 9.15. Характеристики ПП и пирометров спектрального

Модификация прибора	Диапазон измеряемых температур, °С		Номинальная статическая характеристика	Эффективная длина волны, мкм	Показатель визирования
	от	до			
«Веселка-4-1»	1300	1800	1ФС-18	$\lambda_1 = 0,44$	1 : 25
	1600	2200	1ФС-22		1 : 50
	2000	2800	1ФС-28		1 : 100
«Веселка-4-2»	1300	1800	1ФС-18	$\lambda_2 = 0,68$	1 : 25
	1600	2200	1ФС-22		1 : 50
	2000	2800	1ФС-28		1 : 100
«Веселка-4-3»	1300	1800	1ФС-18		1 : 25
	1600	2200	1ФС-22		1 : 50
	2000	2800	1ФС-28		1 : 100
«Веселка-5-1»	500	800	1ДС-8	$\lambda_1 = 1,25$	1 : 25
	700	1100	1ДС-11		1 : 50
	900	1400	1ДС-14		1 : 100
«Веселка-5-2»	500	800	1ДС-8	$\lambda_2 = 1,65$	1 : 25
	700	1100	1ДС-11		1 : 50
	900	1400	1ДС-14		1 : 100
«Веселка-5-3»	500	800	1ДС-8		1 : 25
	700	1100	1ДС-11		1 : 50
	900	1400	1ДС-14		1 : 100
«Веселка-6-1»	200	500	1РС-5	$\lambda_1 = 2,65$	1 : 15
	300	700	1РС-7		1 : 25
«Веселка-6-2»	200	500	1РС-5	$\lambda_2 = 3,05$	1 : 15
	300	700	1РС-7		1 : 25
«Веселка-6-3»	200	500	1РС-5		1 : 15
	300	7000	1РС-7		1 : 25

отношения «Веселка» с модуляцией потока излучения

Основная погрешность, %	Быстродействие, с	Комплектность			
		Первичный ПП	Промежуточный преобразователь	ПВ	Потенциометр самопишущий
1,0 1,0 1,0	0,05 0,05 0,05	ПСФ-141	ППС-1	ПВ-2	
1,0 1,0 1,0	2,5 2,5 2,5	ПСФ-141	ППС-1	—	КСП-2
1,0 1,0 1,0	2,5/0,05 2,5/0,05 2,5/0,05	ПСФ-141	ППС-1	ПВ-2	КСП-2
1,5 1,0 1,0	0,1 0,1 0,1	ПСД-141	ППС-3	ПВ-2	—
1,5 1,0 1,0	2,5 2,5 2,5	ПСД-141	ППС-3	—	КСП-2
1,5 1,0 1,0	2,5/0,1 2,5/0,1 2,5/0,1	ПСД-141	ППС-3	ПВ-2	КСП-2
2,0 2,0	0,1 0,1	ПСР-141	ППС-2	ПВ-2	—
2,0 2,0	2,5 2,5	ПСР-141	ППС-2	—	КСП-2
2,0 2,0	2,5/0,1 2,5/0,1	ПСР-141	ППС-2	ПВ-2	КСП-2

Таблица 9.16. Характеристики ПП и пирометров частичного излу

Модификация прибора	Диапазон измеряемых температур, °С		Номинальная статическая характеристика	Эффективная длина волны, мкм	Показатель визирования
	от	до			
«Смотрич-1-1»	100	200	1РЧ-2Н	2,5	1 : 50
	150	350	1РЧ-3,5Н	2,4	1 : 150
	300	700	1РЧ-7Н	2,3	1 : 150
	500	1400	1РЧ-14Н	2,2	1 : 300
	50	200	2РЧ-2Н	3,43	1 : 50
	150	350	2РЧ-3,5Н	3,43	1 : 50
	300	700	2РЧ-7Н	3,43	1 : 100
«Смотрич-1-2»	100	200	1РЧ-2	2,5	1 : 50
	150	350	1РЧ-3,5	2,4	1 : 150
	300	700	1РЧ-14	2,3	1 : 150
	500	1400	1РЧ-14	2,2	1 : 300
	50	200	2РЧ-2	3,43	1 : 50
	150	350	2РЧ-3,5	3,43	1 : 50
	300	700	2РЧ-7	3,43	1 : 100
«Смотрич-1-3»	100	200	1РЧ-2	2,5	1 : 50
	150	350	1РЧ-3,5	2,4	1 : 150
	300	700	1РЧ-7	2,3	1 : 150
	500	1400	1РЧ-14	2,2	1 : 300
	50	200	2РЧ-2	3,43	1 : 50
	150	350	2РЧ-3,5	3,43	1 : 50
	300	700	2РЧ-7	3,43	1 : 100
«Смотрич-2-1»	30	150	1ПЧ-1,5-14Н	8—14	1 : 25
	100	350	1ПЧ-3,5-14Н	8—14	1 : 50
	30	150	1ПЧ-1,5-9Н	8,5	1 : 25
	100	350	1ПЧ-3,5-9Н	8,5	1 : 25
	30	150	1ПЧ-1,5-5Н	5,0	1 : 25
	100	350	1ПЧ-3,5-5Н	5,0	1 : 25
	300	1100	1ПЧ-11-5Н	5,0	1 : 50
	1000	1400	1ПЧ-14-5Н	5,0	1 : 100
	1400	2200	1ПЧ-22-5Н	5,0	1 : 100

чения «Смотрич» с модуляцией потока излучения

Основная погрешность, %	Быстродействие, с	Комплектность			
		Первичный ПП	Промежуточный преобразователь	ПВ	Потенциометр самопишущий
1,0	1,0	ПЧР-141	ППЧ-1	—	—
1,0	0,5				
1,0	0,025				
1,0	0,025				
2,0	1,0				
1,0	0,5				
1,0	0,025				
1,5	1,0	ПЧР-141	ППЧ-1	ПВ-1	—
1,5	0,5				
1,5	0,1				
1,5	0,1				
2,5	1,0				
1,5	0,5				
1,5	0,1				
1,5	1,0	ПЧР-141	ППЧ-1	ПВ-1	КСП-2
1,5	0,5				
1,5	0,1				
1,5	0,1				
2,5	1,0				
1,5	0,5				
1,5	0,1				
2,0	2,5	ПЧП-141	ППЧ-2	—	—
1,0	1,0				
2,0	2,5				
2,0	2,5				
2,0	2,5				
1,5	1,0				
1,0	0,25				
1,0	0,1				
1,5	0,1				

Модификация прибора	Диапазон измеряемых температур, °C		Номинальная статистическая характеристика	Эффективная длина волны, мкм	Показатель визирования
	от	до			
«Смотрич-2-2»	30	150	1ПЧ-1,5-14	8—14	1 : 25
	100	350	1ПЧ-3,5-14	8—14	1 : 50
	30	150	1ПЧ-1,5-9	8,5	1 : 25
	100	350	1ПЧ-3,5-9	8,5	1 : 25
	30	150	1ПЧ-1,5-5	5,0	1 : 25
	100	350	1ПЧ-3,5-5	5,0	1 : 25
	300	1100	1ПЧ-11-5	5,0	1 : 50
	1000	1400	1ПЧ-14-5	5,0	1 : 100
«Смотрич-2-3»	1400	2200	1ПЧ-22-5	5,0	1 : 100
	30	150	1ПЧ-1,5-14	8—14	1 : 25
	100	350	1ПЧ-3,5-14	8—14	1 : 50
	30	150	1ПЧ-1,5-9	8,5	1 : 25
	100	350	1ПЧ-3,5-9	8,5	1 : 25
	30	150	1ПЧ-1,5-5	5,0	1 : 25
	100	350	1ПЧ-3,5-5	5,0	1 : 25
	300	1100	1ПЧ-11-5	5,0	1 : 50
«Смотрич-3-1»	1000	1400	1ПЧ-14-5	5,0	1 : 100
	1400	2200	1ПЧ-22-5	5,0	1 : 100
	800	1200	1ФЧ-12Н	0,656	1 : 25
	1000	1600	1ФЧ-16Н		1 : 50
	1200	1800	1ФЧ-18Н		1 : 100
	1400	2000	1ФЧ-20Н		1 : 200
«Смотрич-3-2»	1700	2600	1ФЧ-26Н		1 : 200
	2100	3500	1ФЧ-35Н		1 : 200
	800	1200	1ФЧ-12	0,656	1 : 25
	1000	1600	1ФЧ-16		1 : 50
	1200	1800	1ФЧ-18		1 : 100
	1400	2000	1ФЧ-20		1 : 200
«Смотрич-3-3»	1700	2600	1ФЧ-26		1 : 200
	2100	3500	1ФЧ-35		1 : 200
	800	1200	1ФЧ-12	0,656	1 : 25
	1000	1600	1ФЧ-16		1 : 50
	1200	1800	1ФЧ-18		1 : 100
	1400	2000	1ФЧ-20		1 : 200
«Смотрич-3-3»	1700	2600	1ФЧ-26		1 : 200
	2100	3500	1ФЧ-35		1 : 200

Продолжение табл. 9.16

Основная погрешность, %	Быстродействие, с	Комплектность			
		Первичный ПП	Промежуточный преобразователь	ПВ	Потенциометр самопишущий
2,5 1,5 2,5 2,0 2,5 2,0 1,5 1,5 2,0	2,5 1,0 2,5 2,5 2,5 1,0 0,25 0,1 0,1	ПЧП-141	ППЧ-2	ПВ-1	—
2,5 1,5 2,5 2,0 2,5 2,0 1,5 1,5 2,0	2,5 1,0 2,5 2,5 2,5 1,0 0,25 0,1 0,1	ПЧП-141	ППЧ-2	ПВ-1	КСП-2
1,0 1,0 1,0 1,0 1,5 1,5	1,0 0,1 0,05 0,01 0,01 0,01	ПЧФ-141	ППЧ-3	—	—
1,5 1,5 1,5 1,5 2,0 2,0	1,0 0,1 0,1 0,05 0,05 0,05	ПЧФ-141	ППЧ-3	ПВ-1	—
1,5 1,5 1,5 1,5 2,0 2,0	1,0 0,1 0,1 0,05 0,05 0,05	ПЧФ-141	ППЧ-3	ПВ-1	КСП-2

Таблица 9.17. Номинальные статические характеристики ПП полного излучения ППТ-121 и ППТ-131

Измеряемая температура, °C	Напряжение выходного сигнала, мВ				
	РФ-4А	РФ-6А	РК-15А	РК-20А	РС-25А
100	0,060	—	—	—	—
200	0,291	—	—	—	—
300	0,772	0,146	—	—	—
400	1,652	0,315	0,014	—	—
500	—	0,590	0,036	—	—
600	—	1,011	0,078	—	—
700	—	—	0,149	—	—
800	—	—	0,263	—	—
900	—	—	0,430	0,100	—
1000	—	—	0,662	0,156	—
1100	—	—	0,967	0,227	—
1200	—	—	1,374	0,320	—
1300	—	—	1,891	0,444	—
1400	—	—	2,525	0,586	0,249
1500	—	—	3,300	0,772	0,337
1600	—	—	—	0,992	0,449
1700	—	—	—	1,261	0,582
1800	—	—	—	1,564	0,746
1900	—	—	—	1,937	0,944
2000	—	—	—	2,498	1,143
2100	—	—	—	—	1,342
2200	—	—	—	—	1,675
2300	—	—	—	—	1,986
2400	—	—	—	—	2,405
2500	—	—	—	—	3,005

Таблица 9.18. Номинальные статические характеристики ПП частичного излучения ПЧД-121, ПЧД-131

Измеряемая температура, °C	Ток выходного сигнала, мкА (мкА/°C), для		Измеряемая температура, °C	Ток выходного сигнала, мкА (мкА/°C), для	
	ДГ-7,5	ДГ-11		ДГ-13	ДГ-17
450	0,567 (0,0100)	2,966 (0,042)	600	0,124 (0,0026)	4,136 (0,024)
500	1,210 (0,0190)		650	0,386 (0,0042)	
550	2,460 (0,0346)		700		
600	4,670 (0,0598)		750	0,975 (0,0085)	
650	8,436 (0,0950)		800		
700	14,159 (0,1440)		850	2,110 (0,015)	
750	22,868 (0,1740)		900		
800	7,634 (0,069)		950	4,136 (0,024)	
850			1000		

Продолжение табл. 9.18

Измеряемая температура, °С	Гок выходного сигнала, мкА (мкА/°С), для		Измеряемая температура, °С	Гок выходного сигнала, мкА (мкА/°С), для	
	ДГ-7,5	ДГ-11		ДГ-13	ДГ-17
900		16,886 (0,124)	1050		
950			1100	7,092 (0,038)	2,459 (0,0182)
1000		32,476 (0,203)	1150		3,197
1050			1200	11,838 (0,057)	4,085 (0,0339)
1100		56,671 (0,273)	1250		5,111
			1300	18,663 (0,077)	6,332 (0,0269)
			1350		7,823
			1400		9,536 (0,0357)
			1450		11,415
			1500		13,558 (0,0461)
			1550		16,058
			1600		18,868 (0,0592)
			1650		21,973
			1700		25,378 (0,0720)

Таблица 9.19. Номинальные статистические характеристики ПП частичного излучения ПЧД-121, ПЧД-131

Измеряемая температура, °С	Гок выходного сигнала, мкА (мкА/°С), для ДК-3	Измеряемая температура, °С	Гок выходного сигнала, мкА (мкА/°С), для ДК-20	Измеряемая температура, °С	Гок выходного сигнала, мкА (мкА/°С), для ДК-25
		1000	0,193 (0,0020)	1500	0,852 (0,0050);
		1050	0,316		
800	0,152 (0,0018)	1100	0,500 (0,0042)	1600	1,355 (0,0062)
850	0,271 (0,0030)	1150	0,762		
900	0,465 (0,0049)	1200	1,118 (0,00787)	1700	2,095 (0,0087)
950	0,771 (0,0076)	1250	1,576		
1000	1,238 (0,0114)	1300	2,183 (0,0142)	1800	3,099 (0,0110)
1050	1,929 (0,0166)	1350	3,009		
1100	2,922 (0,0236)	1400	3,991 (0,0186)	1900	4,345 (0,015)
1150	4,313 (0,0326)	1450	4,970		
1200	6,211 (0,0440)	1500	6,310 (0,0342)	2000	6,039 (0,017)
1250	8,741 (0,0580)	1550	8,430		
1300	12,037 (0,0747)	1600	10,991 (0,0524)	2100	7,820 (0,020)
		1650	13,771		
		1700	16,834 (0,0672)	2200	10,091 (0,028)
		1750	20,507		
		1800	24,736 (0,0911)	2300	13,410 (0,030)
		1850	29,612		
		1900	35,029 (0,1126)	2400	16,156 (0,032)
		1950	40,877		
		2000	47,258 (0,1334)	2500	20,003 (0,039)

**Таблица 9.20. Номинальная статическая характеристика ПП
полного излучения ППТ-142**

Измеряемая температура, °С	Напряжение выходного сигнала, мВ для Р-3	Измеряемая температура, °С	Напряжение выходного сигнала, мВ для Р-3	Измеряемая температура, °С	Напряжение выходного сигнала, мВ для Р-3	Измеряемая температура, °С	Напряжение выходного сигнала, мВ для Р-3
30	0,122	100	1,063	170	2,846	240	5,904
40	0,219	110	1,257	180	3,193	250	6,475
50	0,326	120	1,469	190	3,568	260	7,084
60	0,476	130	1,701	200	3,972	270	7,735
70	0,578	140	1,953	210	4,405	280	8,428
80	0,724	150	2,227	220	4,871	290	9,161
90	0,886	160	2,524	230	5,370	300	9,947

**Таблица 9.21. Номинальные статические характеристики ПП
«Смотрич»**

Модификация прибора	Номинальная статическая характеристика	Измеряемая температура, °С	Напряжение выходного сигнала, * мВ
«Смотрич-1-1-01»	1 РЧ-2Н	100	0 ± 4
		120	43 ± 7
		140	137 ± 13
		160	302 ± 20
		180	562 ± 40
		200	1000 ± 60
«Смотрич-1-1-02»	1 РЧ-3, 5Н	150	0 ± 3
		200	31 ± 10
		250	138 ± 20
		300	400 ± 50
		350	1000 ± 60
«Смотрич-1-1-03»	1 РЧ-7Н	300	0 ± 2
		400	45 ± 6
		500	181 ± 20
		600	470 ± 50
		700	1000 ± 45

* Для преобразователей с выходным сигналом 0...100 мВ напряжение сигнала меньше в 10 раз.

Продолжение табл. 9.21

Модификация прибора	Номинальная статическая характеристика	Измеряемая температура, °С	Напряжение выходного сигнала, мВ
«Смотрич-1-1-04»	1-РЧ-14Н	500	0 ± 4
		600	28 ± 6
		700	78 ± 10
		800	155 ± 12
		900	252 ± 16
		1000	377 ± 20
		1100	525 ± 21
		1200	675 ± 23
		1300	835 ± 24
		1400	1000 ± 24
«Смотрич-1-1-05»	2 РЧ-2Н	50	0 ± 2
		100	79 ± 5
		120	150 ± 10
		140	268 ± 14
		160	432 ± 20
		180	675 ± 28
		2000	1000 ± 32
«Смотрич-1-1-06»	2 РЧ-3, 5Н	150	0 ± 3
		200	77 ± 8
		250	240 ± 16
		300	540 ± 27
		350	1000 ± 37
«Смотрич-1-1-07»	2 РЧ-7Н	300	0 ± 3,5
		400	105 ± 10
		500	302 ± 18
		600	624 ± 26
		700	1000 ± 26
«Смотрич-2-1-01»	1 ПЧ-1, 5-14Н	30	0 ± 15
		50	112 ± 19
		70	250 ± 25
		90	407 ± 26
		110	585 ± 30
		130	782 ± 32
		150	1000 ± 37
«Смотрич-2-1-02»	1ПЧ-3, 5-14Н	100	0 ± 16
		150	150 ± 23
		200	327 ± 31
		250	528 ± 35
		300	768 ± 37
		350	1000 ± 40

Продолжение табл. 9.21

Модификация прибора	Номинальная статическая характеристика	Измеряемая температура, °С	Напряжение выходного сигнала, мВ
«Смотрич-2-1-03»	1 ПЧ-1, 5-9Н	30	0 ± 10
		50	82 ± 15
		70	201 ± 20
		90	342 ± 24
		110	516 ± 28
		130	708 ± 30
		150	1000 ± 37
«Смотрич-2-1-04»	1 ПЧ-3,5-9Н	100	0 ± 14
		150	124 ± 21
		200	293 ± 29
		250	505 ± 31
		300	732 ± 35
		350	1000 ± 35
«Смотрич-2-1-05»	1 ПЧ-1,5-5Н	30	0 ± 5
		50	67 ± 9
		70	169 ± 14
		90	286 ± 20
		110	459 ± 25
		130	716 ± 27
		150	1000 ± 36
«Смотрич-2-1-06»	1 ПЧ-3,5-5Н	100	0 ± 6
		150	65,5 ± 10
		200	191,5 ± 18
		250	380 ± 26
		350	1000 ± 37
«Смотрич-2-1-07»	1 ПЧ-11-5Н	300	0 ± 5
		400	56,6 ± 7
		500	134,5 ± 9
		600	229,5 ± 16
		700	344,4 ± 24
		800	482,5 ± 24
		900	634,7 ± 18
		1000	810 ± 18
		1100	1000 ± 18
«Смотрич-2-1-08»	1 ПЧ-14-5Н	1000	0 ± 35
		1050	125 ± 35
		1100	250 ± 35
		1150	375 ± 35
		1200	500 ± 35
		1250	625 ± 35
		1300	750 ± 35
		1350	875 ± 35
		1400	1000 ± 35

Продолжение табл. 9.21

Модификация прибора	Номинальная статическая характеристика	Измеряемая температура, °C	Напряжение выходного сигнала, мВ
«Смотрич-2-1-09»	1 ПЧ-22-5Н	1400	0 ± 41
		1500	142,5 ± 41
		1600	265 ± 41
		1700	400 ± 41
		1800	528,5 ± 41
		1900	660 ± 41
		2000	785 ± 41
		2100	912 ± 41
		2200	1040 ± 41
«Смотрич-3-1-01»	1 ФЧ-12Н	800	0 ± 1,2
		900	19 ± 4,6
		1000	97 ± 16
		1100	325 ± 48
		1200	1000 ± 96
«Смотрич-3-1-02»	1ФЧ-16Н	1000	0 ± 1,3
		1100	10 ± 3,2
		1200	40 ± 6,7
		1300	104 ± 16
		1400	260 ± 38
		1500	558 ± 58
		1600	1000 ± 00
«Смотрич-3-1-03»	1 ФЧ-18Н	1200	0 ± 3,3
		1300	23 ± 6
		1400	70 ± 11
		1500	156 ± 20
		1600	312 ± 38
		1700	560 ± 60
		1800	1000 ± 120
«Смотрич-3-1-04»	1 ФЧ-20Н	1400	0 ± 6
		1500	36 ± 10
		1600	100 ± 16
		1700	204 ± 29
		1800	372 ± 42
		1900	632 ± 60
		2000	1000 ± 86
«Смотрич-3-1-05»	1 ФЧ-26Н	1700	0 ± 10
		1800	25 ± 12
		1900	61 ± 16
		2000	111 ± 23
		2100	180 ± 31
		2200	271 ± 41
		2300	397 ± 55
		2400	565 ± 70
		2500	766 ± 90
		2600	1000 ± 113

Модификация прибора	Номинальная статическая характеристика	Измеряемая температура, °C	Напряжение выходного сигнала, мВ
«Смотрич-3-1-06»	1 ФЧ-35Н	2100	0 ± 8
		2300	38 ± 11
		2500	97 ± 18
		2700	184 ± 29
		2900	309 ± 45
		3100	482 ± 55
		3300	710 ± 74
		3500	1000 ± 100

ния ПП. Максимальную температуру можно определить с помощью блока запоминания ПВ в задаваемом интервале времени.

Устройства промежуточных преобразователей позволяют вводить поправки на коэффициент излучательной способности. Если излу-

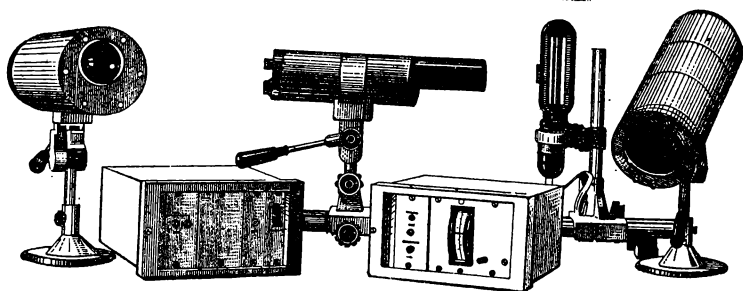


Рис. 9.32. Внешний вид ПП с модуляцией потока излучения («Веселка», «Смотрич»).

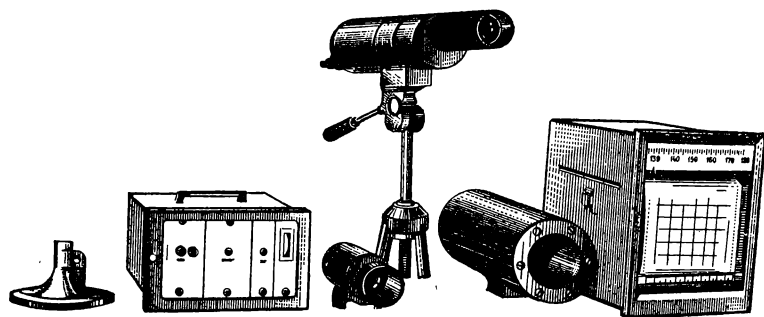


Рис. 9.33. Внешний вид пирометров с модуляцией потока излучения («Веселка» или «Смотрич»).

ние объекта отличается от излучения абсолютно черного тела, то температура, измеренная с помощью энергетических пирометров, будет заниженной по сравнению с его действительной температурой, так как коэффициент излучательной способности объекта меньше 1. Сравнивая показания пирометра, измеряющего действительную температуру, можно исключить погрешность, обусловленную коэффициентом излучательной способности. С помощью переменного сопротивления показания пирометра выставляются на действительную температуру. Промежуточный преобразователь, изменяющий выходной сигнал ПП различных номинальных статических характеристик в электрический сигнал, равный 0...100 мВ, обеспечивает ручную коррекцию на излучательную способность объекта и калибровку измерительного преобразователя.

Кроме приведенных в этом параграфе ПП и пирометров промышленностью СССР выпускаются пирометры полного излучения типа РАПИР с пирометрическим преобразователем ТЕРА-50 (приемник излучения — термобатарея, состоящая из десяти последовательно соединенных термопар; номинальные статические характеристики — стандартные); двухканальные пирометры спектрального отношения типа «Спектропир» и одноканальные пирометры спектрального отношения «Веселка-1» и «Веселка-2».

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИНДИКАТОРЫ

Все термометрические вещества, в общем, являются температурными индикаторами. В этой главе приведены температурные индикаторы, для которых характерны внешние температурные проявления: изменение цвета, формы, структуры и т. п.

10.1. Плавкие металлические вставки

Металлы и их сплавы обладают достаточно надежным постоянством температур плавления. На этом основано применение термочувствительных вставок, конструкция которых выбирается так, чтобы

Таблица 10.1. Химический состав плавких индикаторов температуры

Температура плавления, °C	Состав, % (по массе)	Температура плавления, °C	Состав, % (по массе)
60,5	50Bi—25Pb—12,5Sn—12,5Cd	468	33Mg—67Pb
92	50Bi—30Pb—20Sn	482	55Ag—45Sb
156	In	490	26,7Cu—73,3Mg
199	91Sn—9Zn	510	66Mg—34Ni
215	85Pb—15Au	528	24Cu—76Sb
221	96,5Sn—3,5Ag	542	25,4Cu—74,6Sb
232	Sn	548	33Cu—67Al
236	79,7Pb—17,7Cd—2,6Sb	554	66Cu—34Mg
247	87Pb—13Sb	577	11,7Si—88,3Al
265	82,5Cd—17,5Zn	589	86,9Al—8,3Mg—4,8Si
271	Bi	620	18Cd—16,5Zn—50Ag—15,5Cu
290	95Pb—5Pt	630	Sb
301	97,65Pd—2,35Ag	649	Mg
304	97,5Pb—2,5Ag	660	Al
321	Cd	710	33,5Zn—33Ag—33,5Cu
327	Pb	750	33Zn—24Ag—43Cu
341	30Zn—70Mg	779	71Ag—29Cu
360	25Sb—75Au	800	80Ag—20Cu
381	95Zn—5Al	804	Ce
420	Zn	920	La
434	95Zn—5Ag	958	Ge
450	Te	961	Ag

плавление приводило к необратимым и легко заметным изменениям, например, в виде трубочки или кольца, зачеканиваемых в лунку. Они используются в труднодоступных и трудноконтролируемых местах как свидетели достижения деталью определенной для данной вставки температуры. При низких температурах с аналогичной целью применяют сплавы кристаллических углеводородов между собой и с воском. Дискретность и однозначность точки плавления сплава является одновременно достоинством и недостатком. Для определений температуры в некотором диапазоне применяют серию вставок с последовательным нарастанием температуры плавления. Составы рекомендуемых для вставок сплавов и их температуры плавления приведены в табл. 10.1.

10.2. Конуса Зегера

Конуса Зегера в основном применяются для определения температуры в обжиговых печах. Измерительные элементы представляют собой усеченные высокие трехгранные пирамиды из керамической массы с различными температурами начала размягчения. Стабильность точного состава шихты (окислы калия, кальция, натрия, магния, борная кислота и др.) для конусов, различаемых по номерам, позволяет с достаточной точностью определять температуру в печи.

В печь вставляют три — пять конусов, из которых средний по номеру соответствует измеряемой температуре. При соблюдении режима легкоплавкие конуса расплавляются, более тугоплавкие остаются без видимых изменений, у среднего вершина конуса в процессе размягчения загибается к основанию. Разработанная рецептура (более чем для 64 конусов) позволяет с шагом, не превышающим 50 К, перекрыть диапазон температур от 600 до 2000 °С. При быстром нагреве конуса Зегера показывают температуру примерно на 20 К меньшую, чем при медленном — 0,0055 К/с (20 К/ч). Применение эвтектических смесей достаточно чистых неорганических солей позволяет получить конусы, показания которых не зависят от скорости нагрева.

10.3. Термочувствительные краски

Одно из первых применений термочувствительных красок относится к средним векам, когда в монастыре св. Назара на юге Франции демонстрировалось «чудо» перевоплощения окрашенной металлической иконы под действием скрытого от религиозных наблюдателей подогрева.

Термокраска — суспензия термочувствительных соединений, наполнителей, связующих и растворителей, которая после нанесения на любую твердую поверхность затвердевает при высыхании в виде тонкой пленки и способна изменять свой цвет при температуре перехода. Она применяется для контроля температуры поверхностей, имеющих самую различную форму и конфигурацию, практически в самых различных промышленных условиях и в исследовательской практике: в машиностроении, авиационии, приборостроении, радиоэлектронике и др. Термокраски используются для определения температуры на поверхности как мелких деталей, так и крупногабаритных конструкций в условиях покоя и при движении с большими скоростями.

Термолак — коллоидный раствор термочувствительных соединений с пленкообразующими веществами в летучих растворителях, обладающий способностью при нанесении на поверхность затвердевать при высыхании и изменять свой цвет при температуре перехода. Они имеют то же применение, что и термокраски.

Термопаста — пластично-вязкая смесь веществ, изменяющих свой цвет при температуре перехода. Термопасту можно разбавить соответствующими растворителями, в результате получается либо термокраска, либо термоллак. Она применяется там же, где и термокраска, причем в полевых условиях гораздо удобнее в применении, особенно при упаковке в тубах. Термопастой можно заправлять стержни шариковых ручек.

Термокарандаши — при комнатной температуре определенного цвета пигментированные различными термочувствительными соединениями твердые стержни, штрихи которых на поверхности твердого тела изменяют свой цвета при температуре перехода. Иногда термокарандаши называют термомелками. Термокарандаши предназначены в основном для мгновенного измерения температуры уже нагретых поверхностей, так как, в отличие от термокрасок, некоторые из них плохо наносятся на холодные поверхности материалов, особенно на гладкополированные. На нагретой поверхности карандаши оставляют следы независимо от шероховатости. Их удобно применять при контроле температурных режимов термообработки, при закалке, сварке и во многих других процессах. В некоторых случаях они более удобны в применении, чем термокраски.

Термотаблетка — при комнатной температуре твердая произвольной формы и размеров масса, пигментированная термочувствительными соединениями, которые изменяют свой цвет при температуре перехода. Как и термокарандаши, термотаблетки могут представлять все типы термоиндикаторов. Термотаблетки применяются для индикации температуры внутри крупных изделий или на больших поверхностях, при контроле температуры печей. Плавящиеся термотаблетки используются при изготовлении электропредохранителей.

В некоторых случаях целесообразна печатная технология нанесения термокраски. При мелкосерийном производстве применяют трафаретную печать или печатание с помощью штампов; при крупных сериях — типографский способ. Печатные термокраски применяют также для пропитки лент пишущих машинок.

По характеру превращений термоиндикаторы разделяются на три группы: *обратимые* — индикаторы, которые многократно обратно изменяют цвет в зависимости от температуры и сохраняют соответствие цвета температуре; *необратимые* — индикаторы, в которых при нагревании до температуры перехода и выше происходят необратимые процессы, в результате чего первоначальный цвет после охлаждения не восстанавливается; *квазиобратимые* — индикаторы, которые, изменяя цвет при нагревании до температуры перехода или выше ее, восстанавливают исходный вид и свойства при понижении температуры не сразу, а постепенно, под воздействием влаги, содержащейся в воздухе.

В СССР выпускается три типа термоиндикаторов: термохимические индикаторы в виде красок и карандашей; термоиндикаторы плавления в виде красок; жидкокристаллические термоиндикаторы в виде порошка или его раствора в хлороформе. Люминесцентные термоиндикаторы серийно не производятся. В стадии подготовки серийный выпуск термоиндикаторов плавления в виде карандашей.

Термохимические индикаторные краски выпускаются Рижским лакокрасочным заводом по техническим условиям ТУ 133—67. Полный набор этих термокрасок (табл. 10.2) позволяет контролировать 36 значений температур в диапазоне от 45 до 830 °С. Термокраски 1а, 17, 31, 46, 32 и 4 — квазиобратимые, остальные — необратимые.

Температура перехода, указанная на этикетках упаковок термохимических индикаторных красок, соответствует подъему темпера-

Таблица 10.2. Термохимические индикаторные краски

Марка термокраски	Исходный цвет	Температура перехода, °С, при давлении, Н/м ²		Приобретенный цвет	Теплофизические характеристики		
		1,01 · 10 ³	5,50 · 10 ³		λ, Вт/(м · К)	c, кДж/(кг · К)	α · 10 ⁷ , м ² /с
1а	Светло-розовый	45	35—40	Голубой	0,223	1,118	1,38
17	То же	55	35—40	»	0,221	1,100	1,37
31	Розовый	70	50	Зеленый	0,187	1,300	1,07
46	Светло-зеленый	70	60	Светло-синий	0,238	1,035	1,60
32	Светло-розовый	85	60	»	0,211	1,065	1,42
13	Светло-зеленый	90	105	Светло-коричневый	—	—	—
50	Светло-розовый	110	80	Светло-фиолетовый	0,229	1,132	1,41
4	Светло-зеленый	120	100	Фиолетовый	0,16	1,350	1,13
30	Желтый	130	100	Оранжевый	0,228	1,234	1,26
19	Светло-бирюзовый	150	155	Коричневый	0,278	0,900	2,13
5	Фиолетовый	150	160	Черный	0,379	0,587	4,62
29	Светло-розовый	180	155	Светло-коричневый	0,829	0,299	19,94
2а	Сиреневый	180	170	Синий	0,309	0,710	2,91
6	Светло-зеленый	180	190	Черный	0,274	1,070	2,13
18	Бирюзовый	205	215	Розовый	0,428	0,585	5,28
230	Зеленый	200	210	Бежевый	0,515	0,455	7,77
230	»	400	430	Белый	—	—	—
8	Светло-зеленый	240	220	Коричневый	0,359	0,635	3,86
240	Бирюзовый	250	190	Белый	0,463	0,480	6,65
320	Лиловый	250	250	Бежевый	0,309	0,754	2,91
35	Светло-розовый	280	270	Темно-бежевый	0,260	1,04	2,05
10	Сиреневый	280	320	Черно-синий	—	—	—
33	Бледно-сиреневый	290	285	»	0,240	1,235	1,41
26	То же	320	335	»	0,239	0,891	1,89
12	Синий	360	370	Бежевый	0,843	0,280	20,60
66	Белый	410	385	Коричневый	—	—	—
470	Сине-зеленый	445	485	Светло-серый	0,388	0,524	5,22
47	Горчичный	475	570	Желтый блеклый	—	—	—
15	Оранжевый	470	500	Серый	—	—	—
480	Голубой	485	560	Светло-серый	0,305	0,838	2,512

Марка термоласки	Исходный цвет	Температура перехода, °С, при давлении, Н/м²		Приобретенный цвет	Теплофизические характеристики		
		1,01 · 10 ⁶	5,50 · 10 ³		λ , Вт/(м · К)	χ с, кДж/(кг · К)	α · 10 ⁷ , м²/с
490	Сине-зеленый	510	515	Оранжевый, при остывании бежевый	0,340	0,700	3,39
14	Розовый	570	605	Белый через бежевый	0,995	0,229	29,00
52a	Черный	555	555	Темно-зеленый	0,171	0,814	1,54
7	Бледно-зеленый	700	690	Ярко-зеленый	0,526	0,526	7,02
100	Сиреневый	800	860	Светло-фиолетовый	0,214	1,450	1,07

Таблица 10.3. Температура перехода и цвет квазиобратимых термоласок при больших скоростях нагрева

Марка термоласки	Исходный цвет	Температура перехода, °С	Цвет после воздействия температуры
1a	Светло-розовый	75 300 600	Голубой Коричневый Серый
17	»	65 265 300 600	Голубой Коричневый Черно-коричневый Серый
31	»	65 335 600	Голубовато-зеленый Черный Черный с металлическим блеском
46	Светло-зеленый	90 290 430	Синий Коричневый Черный
32	Светло-розовый	80 220 600	Синий Коричневый Светло-коричневый
4	Светло-зеленый	165 300 480	Фиолетовый Коричневый Черный

Т а б л и ц а 10.4. Термохимические индикаторные карандаши

Марка карандаша	Исходный цвет	Температура перехода, °С	Цвет после воздействия температуры
110	Желтый	130	Оранжевый
240	Бирюзовый	240	Белый
250	Зеленый	250	Светло-коричневый
300	Охристый	300	Красно-коричневый
380	Бледно-зеленый	380	Серый через светло-коричневый
400	Белый	400	Светло-коричневый через бежевый
410	Голубой	410	Светло-бежевый через серый
470	Сине-зеленый	470	Белый через темно-зеленый

Т а б л и ц а 10.5. Термохимические индикаторные порошки (обратимые)

Название	Формула	Технические условия	Исходный цвет	Температура перехода, °С	Цвет после воздействия температуры
Серебро-ртуть-йодистое	$2\text{AgI} \cdot \text{HgI}_2$	МРТК 6-09-987—63	Ярко-желтый	45 ± 5 95 ± 5	Оранжевый Карминово-красный
Медь-ртуть-йодистая	$2\text{CuI} \cdot \text{HgI}_2$	МРТУ 6-09-1185—64	Ярко-красный	70 ± 5 85 ± 5	Коричневый Черный
Йодистый свинец	PbI_2	МРТУ 6-09-1304—64	Желтый	230 250 360	Красно-оранжевый Красный Красно-лиловый
Сернистая ртуть (киноварь)	HgS	МРТК 6-09-519—63	Ярко-красный	250 320	Кофейный Черный
Оксид ртути красная	HgO	МРТУ 6-09-3252—66	Красный	356	Черный

Т а б л и ц а 10.6. Термокраски плавения, выпускаемые Рижским лакокрасочным заводом

Марка термокраски	Температура перехода, °С	Погреш- ность измере- ний, К	Исходный цвет	Цвет после воздействия температуры	Термофизические характеристики			
					c_p , кДж/(м² × × К)	λ , Вт/(м · К)	$\alpha \cdot 10^2$, м²/с	
ТП-36	36	2	Светло-оранжевый	Темно-оранжевый	—	—	—	
ТП-44	44	2	Салатовый	Зеленый	—	—	—	
ТП-52	52	1	Розовый	Малиновый	1,4	0,1	0,72	
ТП-55	55	2	Светло-голубой	Синий	1,4	0,1	0,72	
ТП-58	58	2	Светло-желтый	Темно-желтый	—	—	—	
ТП-60	60	1	Светло-розовый	Красный	1,5	0,1	0,68	
ТП-65	65	1	Кремовый	Желтый	—	—	—	
ТП-67	67	2	Светло-розовый	Красный	2,0	0,13	0,66	
ТП-68	68	2	Светло-салатовый	Зеленый	—	—	—	
ТП-77	77	1	Бледно-терракотовый	Терракотовый	1,8	0,13	0,72	
ТП-79	79	1	Белый	Зеленый	1,5	0,20	1,40	
ТП-84	84	2	Светло-розовый	Малиновый	—	—	—	
ТП-86	86	2	Светло-кофейный	»	1,4	0,15	1,10	
ТП-90	90	2	Светло-голубой	Синий	1,1	0,16	1,50	
ТП-93	93	2	Кремовый	Ярко-желтый	1,5	0,15	1,00	
ТП-94	94	2	Светло-розовый	Красный	1,9	0,12	0,63	
ТП-95	95	2	Светло-салатовый	Зеленый	1,5	0,15	1,00	
ТП-97	97	2	Светло-голубой	Синий	1,5	0,11	0,74	
ТП-102	102	2	Светло-розовый	Малиновый	1,4	0,15	1,10	
ТП-106	106	2	Желтый	Оранжево-красный	1,8	0,14	0,80	
ТП-109	109	2	Белый	Зеленый	2,5	0,098	0,39	
ТП-109а	109	2	»	Черный	2,6	0,095	0,36	
ТП-111	111	2	»	Бесцветный	2,7	0,095	0,36	
ТП-116	116	1	Светло-бирюзовый	Темно-бирюзовый	2,6	0,095	0,40	
ТП-122	122	2	Светло-розовый	Красный	2,3	0,15	0,64	
ТП-123	123	2	Светло-голубой	Синий	2,0	0,10	0,53	
ТП-126	126	1	»	»	1,6	0,17	1,10	

ТП-130	130	1	Светло-салатовый	Зеленый	1,7	0,16	0,96
ТП-134	134	2	Светло-сиреневый	Темно-сиреневый	1,4	0,17	1,20
ТП-136	136	2	Розовато-оранжевый	Суриково-красный	2,1	0,12	0,56
ТП-142	142	2	Светло-кофейный	Коричневый	—	—	—
ТП-144	144	2	Лимонный	Желтый	1,9	0,27	1,40
ТП-145	145	2	Светло-розовый	Малиновый	1,6	0,20	1,20
ТП-150	150	2	Светло-салатовый	Зеленый	1,5	0,15	1,00
ТП-152	152	2	Светло-голубой	Бирюзовый	—	—	—
ТП-155	155	2	Абрикосовый	Оранжевый	1,9	0,12	0,63
ТП-160	160	1	Светло-голубой	Бирюзовый	1,7	0,16	0,97
ТП-167	167	1	Салатовый	Зеленый	2,0	0,27	1,40
ТП-172	172	2	Розовый	Красный	2,1	0,14	0,67
ТП-177	177	2	Светло-голубой	Синий	—	—	—
ТП-179	179	2	Светло-розовый	Красный	2,9	0,013	0,45
ТП-182	182	2	Светло-салатовый	Зеленый	2,7	0,15	0,68
ТП-193	193	2	Светло-желтый	Оранжевый	2,4	0,15	0,67
ТП-199	199	2	Лимонный	Зеленый	2,5	0,15	0,60
ТП-203	203	1%	Кремовый	Желтый прозрачный	—	—	—
ТП-212	212	1%	»	То же	2,3	0,10	0,43
ТП-218	218	1%	Светло-салатовый	Зеленый	—	—	—
ТП-223	223	1%	Светло-розовый	Красный	1,3	0,34	2,6
ТП-245	245	1%	»	»	—	—	—
ТП-254	254	1%	Белый	Бесцветный	1,6	0,14	0,92
ТП-269	269	1%	Светло-розовый	Оранжевый	—	—	—
ТП-271	271	1%	Светло-голубой	Синий	—	—	—
ТП-284	284	1%	Светло-салатовый	Зеленый	—	—	—
ТП-302	302	1%	Светло-абрикосовый	Оранжевый	—	—	—
ТП-322	322	1%	Белый	Коричневый	—	—	—
ТП-332	332	1%	Светло-серый	Черный	—	—	—
ТП-360	360	1%	Светло-салатовый	Зеленый	—	—	—
ТП-394	394	1%	Светло-серый	Черный	—	—	—
ТП-424	424	1%	Абрикосовый	Оранжевый	—	—	—
ТП-560	560	1%	Белый	Бесцветный	—	—	—

Т а б л и ц а 10.7. Термокраски плавления, выпускаемые Ставропольским заводом химических реактивов и люминофоров

Марка термокраски	Температура перехода, °С	Погрешность измерений, К	Исходный цвет	Цвет после воздействия температуры
ТИ-30	30	1	Белый непрозрачный	Бесцветный прозрачный
ТИ-35	35	1	То же	То же
ТИ-40	40	1	» »	» »
ТИ-50	50	1	» »	» »
ТИ-60	60	1	» »	» »
ТИ-65	65	1	» »	» »
ТИ-65с	65	1	Синий непрозрачный	Прозрачный с синим оттенком
ТИ-65ж	65	1	Желтый непрозрачный	Прозрачный с желтоватым оттенком
ТИ-65з	65	1	Зеленый непрозрачный	Прозрачный с зеленым оттенком
ТИ-75	75	1	Белый непрозрачный	Бесцветный прозрачный
ТИ-85	85	1	То же	То же
ТИ-90	90	1	» »	» »
ТИ-95	95	1	» »	» »
ТИ-105	105	1	» »	» »
ТИ-105с	105	1,5	Синий непрозрачный	Прозрачный с синеватым оттенком
ТИ-105ж	105	1,5	Желтый непрозрачный	Прозрачный с желтоватым оттенком
ТИ-105з	105	1,5	Зеленый непрозрачный	Прозрачный с зеленоватым оттенком
ТИ-114	114	1,5	Белый непрозрачный	Бесцветный прозрачный
ТИ-120	120	1,5	То же	То же
ТИ-120с	120	1,5	Синий непрозрачный	Прозрачный с синеватым оттенком
ТИ-120ж	120	1,5	Желтый непрозрачный	Прозрачный с желтоватым оттенком
ТИ-120з	120	1,5	Зеленый непрозрачный	Прозрачный с зеленоватым оттенком
ТИ-140	140	1,5	Белый непрозрачный	Бесцветный прозрачный
ТИ-150	150	1,5	То же	То же
ТИ-150з	150	1,5	Зеленый непрозрачный	Прозрачный с зеленоватым оттенком
ТИ-150р	150	1,5	Розовый непрозрачный	Прозрачный с розоватым оттенком
ТИ-160	160	1,5	Белый непрозрачный	Бесцветный прозрачный
ТИ-180	180	2	То же	То же
ТИ-210	210	2	» »	» »
ТИ-215	215	2	» »	» »
ТИ-220	220	2	» »	» »

Марка термо-краски	Темпе-ратура перехода, °С	Погреш-ность измерений, К	Исходный цвет	Цвет после воздействия температуры
ТИ-220р	220	2	Розовый непрозрачный	Прозрачный с розоватым оттенком
ТИ-230	230	2	Белый непрозрачный	Бесцветный прозрачный

туры перехода в течение 2 мин и выдержке при температуре перехода в течение 30 с. Квазиобратимые краски этого набора после использования восстанавливают свой первоначальный цвет через 0,5...2 ч при относительной влажности воздуха более 70 %. При больших скоростях нагрева (0,8...1,7 К/с и более) поведение некоторых квазиобратимых термокрасок отличается от стационарных проявлений: они более контрастно изменяют свою окраску и многократно изменяют цвет (табл. 10.3).

Термохимические индикаторные карандаши изготавливаются Рижским лакокрасочным заводом в соответствии с техническими условиями ТУ 6-10-1110—71 в виде цилиндрических стержней длиной 70 мм и диаметром 8 мм, заостренных с одного конца. Цвет их изменяется необратимо. Характеристика полного набора термокарандашей приведена в табл. 10.4.

Термохимические индикаторные порошки (обратимые), выпускаемые промышленностью, можно использовать для термоконтроля (табл. 10.5). Смесь термopорошков с кремний-органическими бесцветными лаками в соотношении 1 : 1 позволяет получить термолаки.

Термоиндикаторные краски плавления серии ТП, выпускаемые Рижским лакокрасочным заводом по техническим условиям ТУ-6-10-1131—71, составляют набор из 60 наименований и охватывают диапазон температуры от 36 до 560 °С (табл. 10.6). Точность измерения температуры этими индикаторами достаточно высока и составляет (0,5...1) % для температур до 200 °С и 1 % для более высоких температур.

Термоиндикаторная краска плавления серии ТИ выпускается Ставропольским заводом химических реактивов и люминофоров по техническим условиям ТУ 6-09-17-39—73. Большинство термокрасок серии ТИ в исходном состоянии имеет белый цвет. Некоторые составы содержат красители синего, желтого, зеленого, розового цвета и имеют обозначения марки по первой букве цвета красителя. Тонкий слой высохшего покрытия этих термокрасок непрозрачен. При достижении температуры проявления покрытие становится прозрачным. Поэтому желательно выбирать цвет термоиндикатора контрастным с исходной окраской изделия. Если поверхность белая или серая, следует брать термокраску с красителем. В табл. 10.7 приведены краткие характеристики набора термоиндикаторов, состоящего из термокрасок белого цвета 21 наименования, охватывающих диапазон температуры от 30 до 230 °С, и из термокрасок 12 наименований, имеющих краситель. Точность измерения температуры термоиндикаторами серии ТИ так же, как и серии ТП, высока. Термоиндикаторы плавления этой серии можно нанести на поверхность объекта исследования более тонким слоем, чем термокраски плавления серии ТП. В результате возра-

Таблица 10.8. Жидкокристаллические вещества холестерического типа

Марка термо-краски	Наименование	Температура перехода, °C	
		в жидкокристаллическое состояние	в изотропную жидкость
X-19	Холестерилформиат	60...63	93...99
X-3	Холестерилацетат	—	111...116
X-10	Холестерилпропионат	93,5...97	111,5...114
X-9	Холестерилбутират	97...100,5	107,5...111
X-4	Холестерилвалерат	88...92	≥ 95
X-11	Холестерилкапронат	100...93	≥ 95
X-12	Холестерилэнантат	—	≥ 109
X-6	Холестерилкаприлат	—	106...109
X-17	Холестерилпеларгонат	77...79	≥ 87
X-5	Холестерилкапринат	81...85	≥ 88
X-18	Холестерилундецилат	—	90...93
X-8	Холестериллаурат	—	90...93
X-20	Холестерилтри децилат	60...64	83...86
X-15	Холестерилмиристат	69,5...72,5	82,5...84,5
X-28	Холестерилцентадецилат	68...72	80...84
X-2	Холестерилпальмитат	≥ 70	80...86
X-7	Холестерилстеарат	—	76...86
X-1	Холестерилбензоат	145,5...148,5	175,5...179
X-14	Холестерил- <i>n</i> -нитробензоат	185...189,5	≥ 235
X-22	Холестерил- <i>n</i> -метилбензоат	178...182	≥ 230
X-40	Холестерил- <i>n</i> -бутилбензоат	125...129	≥ 210
X-23	Холестерил- <i>n</i> -бромбензоат	103,5...107,5	132...136
X-24	Холестерил- <i>n</i> -бромбензоат	174...178	≥ 230
X-29	Холестерил- <i>n</i> -хлорбензоат	104,5...108,5	≥ 144
X-25	Холестерил- <i>n</i> -хлорбензоат	166...170	≥ 200
X-30	Холестерил- <i>n</i> -метоксибензоат	175...179	≥ 250
X-35	Холестерил- <i>n</i> -гексилоксибензоат	146...150	≥ 220
X-37	Холестерил- <i>n</i> -октилоксибензоат	135,5...137,5	≥ 200
X-13	Холестерилциннамат	≥ 156	≥ 197
X-21	Холестерил- <i>n</i> -нитроциннамат	169...173	240...244
X-26	Холестерилхлорид	—	≥ 94

**Таблица 10.9. Марки термохимических индикаторов
зарубежного производства**

Торговая марка (страна)	Ассорти- мент	Число изменений цвета	Диапазон измеряемой температуры, °С		Разность температур между со- седними крас- ками шкалы, К
			от	до	
«Термоколор» (ФРГ)	23	1	40	1350	10...100
	9	2	55	1600	10...305
	5	3	65	820	30...280
«Детектотемп» (США)	23	1	40	1350	15...100
	6	2	80	560	10...240
	4	3	150	760	15...305
	2	4	250	800	60...350
«Термопаларм» (США)	3	1	82	204	11...111
	1	2	204	482	—
«Термопэйт» (Япония)	20	1	50	460	10...50
«Термоиндекс» (Англия, Канада)	5	1	160	320	10...85
	5	2	80	315	5...120
	3	3	150	500	5...115
	2	4	285	800	30...175
	1	5	285	335	15...50
	1	6	155	340	5...75
«Калоколор» (ГДР)	1	12	120	420	20...50
«Термокарандаши» (Ру- мыния)	11	1	45	285	15...50
«Термоколоры» (Польша)	3	1	35	65	10...20
	4	2	100	500	5...270
«Термоколери» (Чехосло- вакия)	25	1	35	500	5...140
	5	2	60	400	15...60
	2	3	135	350	50...80

стает скорость срабатывания, уменьшается погрешность измерения и масса покрытия.

В качестве визуальных термоиндикаторов удобно использовать жидкие кристаллы. Наиболее широко распространены вещества холестерического типа (табл. 10.8). Серийный выпуск жидкокристаллических индикаторов температуры освоен на Харьковском заводе химических реактивов.

Некоторые термоиндикаторы, изготавливаемые зарубежными фирмами, приведены в табл. 10.9 и 10.10.

Таблица 10.10. Краткий перечень зарубежных термоиндикаторов

Торговая или фирменная марка термоиндикатора (страна)	Тип	Вид	Диапазон измеряемой температуры, °С	
			от	до
«Темпилстикс» (США)	ТХ	Термокарандаш	38	1370
«Темпиллак»		Термолак	45	1370
«Темпилпеллетс»		Термотаблетка	38	1540
«Термопаларм»		Термокраска	80	800
«Термоиндекс»		Термокраска	38	1370
«Темпилстикс» (США)	ТП	Термокарандаш	38	1375
«Темпиллак»		Термолак	45	1375
«Темпилпеллетс»		Термотаблетка	38	1650
«Темпилабел»		Термобумага		
«Спектротерм»	ЖК		—20	+350
«Термоколор» (ФРГ)	ТХ	Термокраска	40	1350
«Термохром»		Термокарандаш	65	670
«Мэрк, Ликристалл» (ФРГ)	ЖК		17	49
«Термоколери» (Чехословакия)	ТХ	Термокраска	20	500
«Вуска» (Чехословакия)	ТП	Термолак Термокарандаш Термотаблетка	69	1050
«Термопэйнт» (Япония)	ТХ	Термокраска	50	460

10.4. Облученные кристаллы

Действие этих индикаторов основано на изменении параметров кристаллической решетки облученного нейтронами кристалла в зависимости от температуры и времени выдержки. Их преимущества — малые габариты, широта диапазона измерения температуры в большом интервале времени выдержки при обеспечении достаточно высокой точности.

В процессе облучения в кристаллических материалах накапливаются дефекты. При нагревании облученного вещества происходит уменьшение концентрации дефектов. Чем выше температура и продолжительнее время выдержки, тем большее количество дефектов отжигается. При этом свойства вещества частично или полностью восстанавливаются.

Восстановление свойств вещества зависит от его кристаллической структуры и типа дефектов, внесенных облучением. После облучения

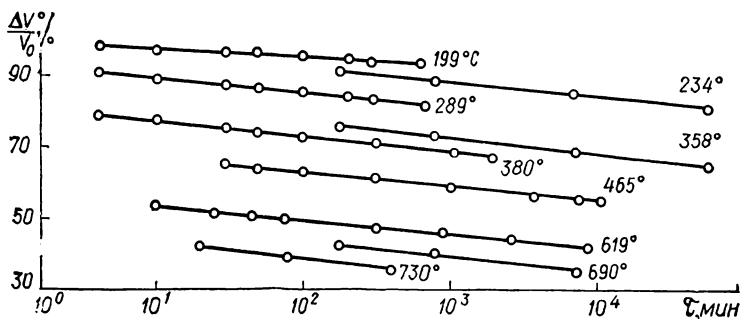


Рис. 10.1. Изотермический отжиг облученного алмаза ($\Delta V/V_0 = 3,25\%$).

дефекты локализованы в некоторых точках кристаллической решетки, и при низких температурах их подвижность мала. При повышении температуры подвижность возрастает, дефекты перемещаются к стокам и уничтожаются. Температура отжига (при равных временах выдержки) различных дефектов различна, поэтому возврат свойств при отжиге происходит ступенчато, по стадиям. Число стадий соответствует количеству типов дефектов, присутствующих в материале. Восстановление свойств решетки облученных кристаллов таких веществ, как алмаз, карбид кремния, при отжиге происходит плавно. Плавный ход отжига расширения решетки алмаза объясняется тем, что даже дефекты одного типа имеют различную энергию активации отжига. Поэтому алмаз получил наиболее широкое среди кристаллов использование в термометрических целях. На рис. 10.1 представлены изменения объемного расширения кристаллической решетки алмаза при изотермическом отжиге. Примерный график номинальных статических характеристик алмаза приведен на рис. 10.2. Отжиг алмаза при температуре выше 600 °C необходимо проводить в вакууме $1,32 \cdot 10^{-2}$ Па, так как он начинает окисляться.

Конструкции и технические характеристики индикаторов. При рентгеновском способе измерения параметров кристаллической решетки необходимо около 1 мг облученного алмаза. Для увеличения точности измерения используется смесь облученного и эталонного алмазов. Корпус индикатора представляет собой цилиндрическую капсулу длиной 5 мм и диаметром 1 мм. Материал капсулы — нержавеющая сталь. Диаметр внутреннего отверстия капсулы — 0,6 мм; высота

$\Delta V/\Delta V_0, \%$

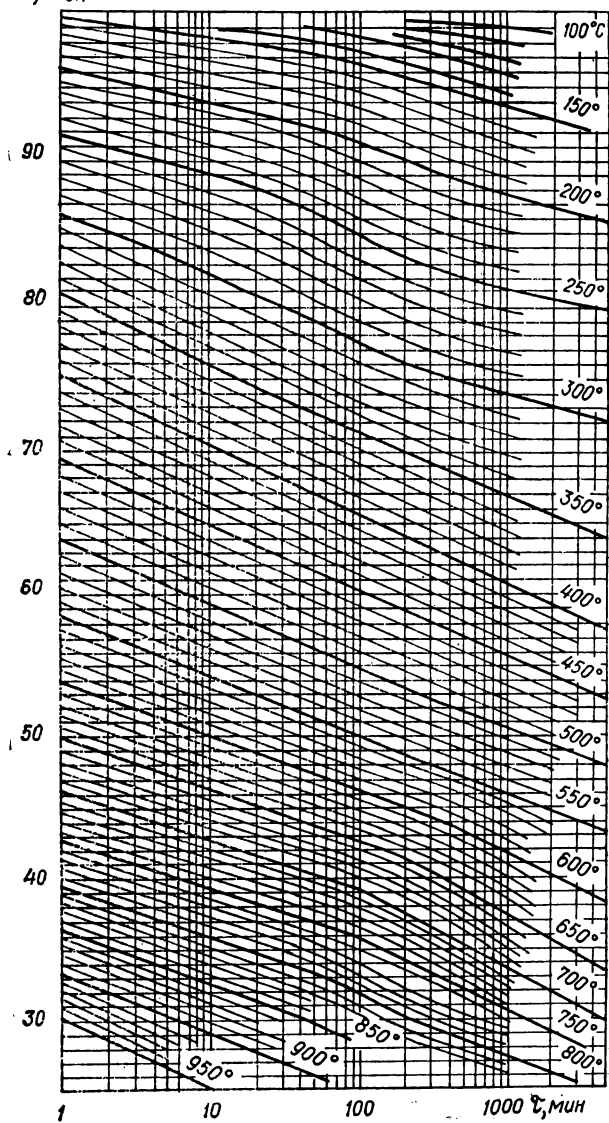


Рис. 10.2. Рабочий график для определения температуры ($\Delta V/V_0 = 3,81 \%$).

столбика, заполняемого порошком алмаза, — 3,5 мм. После заполнения капсулу закрывают пробкой и обвальцовывают, производят обжатие корпуса в месте расположения пробки. Конструкция индикатора представлена на рис. 10.3. Правильность изготовления капсулы, расположения пробки и т.п. должны быть проверены методом рентгеновской дефектоскопии. Просвечиванию подвергаются партии индикаторов по 50...300 шт.

Если алмазный порошок засыпать непосредственно в отверстия, выполненные в термометрируемой детали, то объем может быть уменьшен до $0,5 \text{ мм}^3$. Дальнейшее уменьшение габаритов индикатора возможно при использовании облученных монокристаллов алмаза. В принципе, можно применять кристаллы объемом порядка $0,00001 \text{ мм}^3$, однако техника съемки рентгенограмм в этом случае значительно усложняется.

Термоиндикатор из облученного алмаза позволяет измерять максимальную температуру при стационарных и нестационарных режимах испытания. Применение нескольких индикаторов дает возможность измерять температуру переходного режима. Индикатор целесообразно использовать в движущихся, вращающихся частях машин и механизмов, где по различным причинам невозможен или затруднен контроль с помощью других методов. Для измерения температуры в диапазоне $1300\text{—}2500^\circ\text{C}$ в качестве вещества индикатора используют графит. Полученный при 1300°C графит структурно несовершенен, что проявляется, в частности, в увеличении параметра решетки ($c = 6,92 \text{ \AA}$). Последующая выдержка графита при температуре до 2500°C приводит к постепенному совершенствованию структуры, параметр решетки при этом уменьшается до $6,74 \text{ \AA}$. Поэтому графит можно использовать и для термометрирования.

Общий недостаток термоиндикаторов с дефектами кристаллической решетки — зависимость от трудноконтролируемого фактора времени экспозиции.

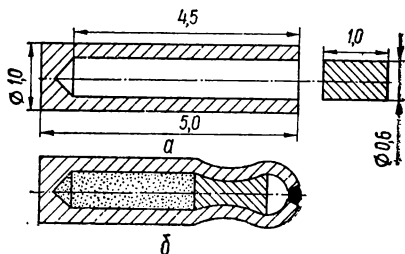


Рис. 10.3. Конструкция индикатора до (а) и после (б) заполнения алмазным порошком.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ И ВНУТРИ ТЕЛА

11.1. Погрешности измерения температуры внутри тела

Для исследования распределения температуры внутри твердых или сыпучих тел применяют ИПТ различного конструктивного оформления. Методическая погрешность при контактном измерении внутренних температур зависит от ряда факторов, важнейшими из которых являются особенность расположения термодатчика внутри тела и его ориентация относительно первоначального направления теплового потока; отличие термического сопротивления термодатчика от термического сопротивления того участка тела, где размещается термодатчик; разница в удельных теплоемкостях и плотностях термодатчика и исследуемого объекта.

Полный учет влияния перечисленных факторов требует совместного решения двух задач: анализа температурного поля в исследуемом теле при отсутствии ИПТ и изучения распределения температур в системе «объект и находящийся в нем ИПТ». Провести этот анализ в форме, удобной для последующего инженерного расчета, удается лишь в ограниченных случаях при ряде допущений относительно выбора тепловых моделей тела и ИПТ. Поэтому для уменьшения методической погрешности измерения желательно соблюдать следующие требования: 1) объем и размеры ИПТ выбирать минимальными; 2) теплофизические свойства ИПТ по возможности приближать к теплофизическим свойствам исследуемого тела; 3) ИПТ располагать в изотермической области, что особенно важно при исследовании поля температур в непосредственной близости от границ тела.

Цилиндрический ИПТ в толще массивного тела. Если в теле существует заданное одномерное температурное поле $t_0(z)$ с первоначальным градиентом $b = dt_0(z)/dz$, К/м, то цилиндрический ИПТ радиусом R с осью, параллельной изотермам поля $t_0(z)$, будет искажать это поле. Величина температурного возмущения внутри ИПТ определится зависимостью

$$\Delta_t(z) = t_s(z) - t_0(z) = \frac{\lambda_0 - \lambda_s}{\lambda_0 + \lambda_s} bz, \quad (11.1)$$

где z — координата; λ_0 и λ_s — коэффициенты теплопроводности объекта и ИПТ

Качественно ход разности $\Delta_t(z)$ внутри и вне ИПТ вдоль оси z при $\lambda_s < \lambda_0$ показан на рис. 11.1, а. Если чувствительный элемент цилиндрического ИПТ, например электроды термодатчика или нить термометра сопротивления, расположен в центре 0 сечения ИПТ или равномерно заполняет всю область I , что характерно для полупроводниковых ИПТ, то погрешность измерения температуры $\Delta_t = 0$, т. е. по-

казания ИПТ $t_z(z)$ полностью соответствуют температуре тела $t_0(z)$ на уровне $z = 0$. При наличии децентрировки чувствительного элемента возникают дополнительные погрешности.

Зона возмущения температуры по оси z за пределами расположения ИПТ (вне области 1 на рис. 11.1, б) определяется неравенствами

$$z_\delta \geq \frac{R}{\delta}, \text{ если } \left| \frac{\Delta_t(z_\delta)}{\Delta_{t, \text{макс}}} \right| \leq \delta, \quad (11.2)$$

где

$$\Delta_{t, \text{макс}} = \left| \frac{\lambda_0 - \lambda_3}{\lambda_0 + \lambda_3} \right| bR. \quad (11.3)$$

В реальных условиях ИПТ имеет неоднородную структуру, т.е. состоит из нескольких элементов с различными свойствами, отделен от стенок массива зазором и т.п.

Если температура массивного тела зависит от времени τ и чувствительный элемент ИПТ расположен в центре области $z = 0$ (рис. 11.1, б), то динамическая погрешность ИПТ $\Delta_{\text{дин}}$, т.е. разность между измеренной $t_z(0, \tau)$ и действительной $t_0(0, \tau)$ температурами, приближенно оценивается по формуле

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{дин}} &= t_z(0, \tau) - t_0(0, \tau) = \\ &= (\varepsilon_0 - \varepsilon_3) \frac{dt_z(0, \tau)}{d\tau}, \\ \varepsilon_0 &\approx \frac{3R^2}{4a_0}, \quad \varepsilon_3 \approx \\ &\approx \frac{R^2}{4a_3} \left(1 + 2 \frac{\lambda_3}{\lambda_0} \right), \quad (11.4) \end{aligned}$$

где $a_0, \lambda_0, a_3, \lambda_3$ — коэффициенты температуро- и теплопроводности соответственно массива и ИПТ. Дополнительным источником методических погрешностей является нагрев находящегося внутри тела ИПТ измерительным током.

Влияние границы тела на погрешность измерения температуры. Погрешность измерения температуры Δ_t , определяемая разницей между измеренной $t_z(0)$ и действительной $t_0(0)$ температурами, оценивается по формуле

$$\Delta_t = t_z(0) - t_0(0) = -bR\Theta_0, \quad (11.5)$$

где Θ_0 в зависимости от переменных

$$\omega = \frac{\lambda_3}{\lambda_0}, \quad \eta = \frac{h}{R}$$

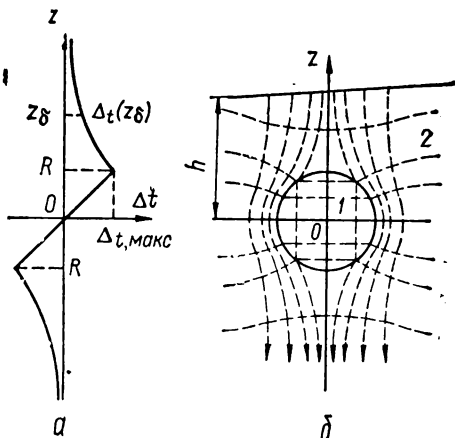


Рис. 11.1. Измерение температуры внутри массивного тела:

а — возмущение температуры; б — схема расположения ИПТ: 1 — ИПТ; 2 — массив; \downarrow — направление тепловых потоков; $-\cdots-$ — направление изотерм.

определяется графиком рис. 11.2. При $\eta = h/R > 5$ вместо (11.5) используется асимптотическая формула

$$\Delta t = t_3(0) - t_0(0) = \frac{1}{2} bR \frac{R}{h} \frac{\lambda_3 - \lambda_0}{\lambda_3 + \lambda_0}. \quad (11.6)$$

В исследовательской практике разности температур измеряют по показаниям двух или нескольких ИПТ. При выборе расстояний между соседними ИПТ следует учитывать влияние зон возмущения от каждого из них (см. (11.2)), а также влияние границы тела (см. (11.5) и (11.6)).

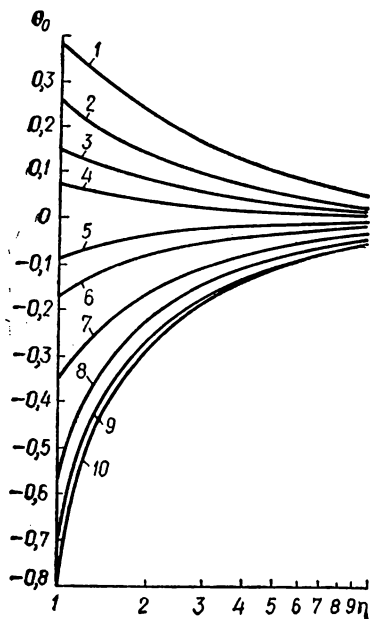


Рис. 11.2. Функция Θ_0 :

1 — ∞ ; 2 — 0,25; 3 — 0,5; 4 — 0,75; 5 — 1,5; 6 — 2; 7 — 4; 8 — 10; 9 — 100; 10 — ∞ .

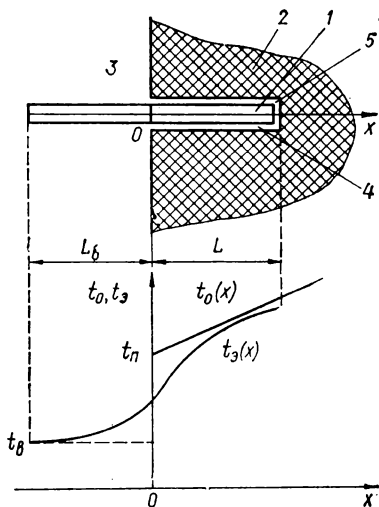


Рис. 11.3. Схема расположения стержневого ИПТ:

1 — ИПТ; 2 — исследуемое тело; 3 — окружающая среда; 4, 5 — зазор.

11.2. Измерение внутренних температур ИПТ стержневого типа

Этот распространенный на практике случай измерения схематически показан на рис. 11.3. ИПТ стержневого типа погружают в исследуемое (твердое или сыпучее) тело 2 на глубину L . Выступающая часть ИПТ длиной L_b находится в лучисто-конвективном теплообмене с окружающей средой 3, имеющей постоянную температуру t_b . Исследуемое тело достаточно велико и рассматривается как полупространство, в котором распределение температур определяется линейной зависимостью:

$$t_0(x) = t_n + bx, \quad (11.7)$$

где b — градиент изменения температуры в направлении оси x . Между ИПТ и телом могут существовать зазоры, эффективная толщина h_3 и теплопроводность λ_3 которых предполагаются известными. Заданы периметр p и площадь S поперечного сечения ИПТ, а также его действительные или эффективные (для сложного неоднородного ИПТ) коэффициенты теплопроводности λ_3 и $\lambda_{3п}$ в продольном и поперечном направлениях. Заданы коэффициент теплопроводности λ_0 тела и коэффициент теплопередачи K_b выступающей части стержня со средой.

Если действительная температура тела на расстоянии x от поверхности — $t_0(x)$, а измеренная — $t_3(x)$, то методическая погрешность $\Delta_t(x)$ состоит из двух слагаемых:

$$\Delta_t(x) = t_3(x) - t_0(x) = \Delta_L(x) + \Delta_b(x), \quad (11.8)$$

первое из которых зависит от глубины погружения L и разности между температурами t_n и t_b поверхности тела и среды, а второе определяется градиентом температур b в исследуемом теле. Приближенная оценка составляющих следующая:

$$\Delta_L(x) = -\frac{t_n - t_b}{1 + F} \frac{\kappa \operatorname{ch} \kappa (1 - \rho) + \xi_3 \operatorname{sh} \kappa (1 - \rho)}{\kappa \operatorname{ch} \kappa + \xi_3 \operatorname{sh} \kappa}, \quad (11.9)$$

$$\Delta_b(x) = -bL \frac{\operatorname{sh} \kappa \rho - \Phi [\kappa \operatorname{ch} \kappa (1 - \rho) + \xi_3 \operatorname{sh} \kappa (1 - \rho)]}{\kappa \operatorname{ch} \kappa + \xi_3 \operatorname{sh} \kappa}, \quad (11.10)$$

где

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= \beta L, \quad \beta = \sqrt{\frac{Kp}{\lambda_3 S}}, \quad K \approx \left(\frac{1}{\alpha_0} + \frac{h_3}{\lambda_3} + \frac{R}{4\lambda_{3п}} \right)^{-1}; \\ \xi_3 &= \frac{K_3 L}{\lambda_3}, \quad \rho = \frac{x}{L}, \quad \alpha_0 \approx \frac{\lambda_0}{R}, \quad K_3 \approx \left(\frac{1}{\alpha_0} + \frac{h_3}{\lambda_3} \right)^{-1}; \\ F &= \frac{L_b}{L} \frac{\kappa \operatorname{sh} \kappa + \xi_3 \operatorname{ch} \kappa}{\kappa \operatorname{ch} \kappa + \xi_3 \operatorname{sh} \kappa} \frac{\kappa}{\omega \operatorname{th} \omega}, \quad \omega = \sqrt{\frac{K_b p}{\lambda_3 S}} L_b; \\ \Phi &= \frac{L_b}{L(1+F)} \frac{\kappa (\operatorname{ch} \kappa - 1) + \xi_3 \operatorname{sh} \kappa}{\kappa \operatorname{ch} \kappa + \xi_3 \operatorname{sh} \kappa}. \end{aligned} \right\} \quad (11.11)$$

Из выражений (11.8) — (11.11) получаются частные формулы для оценки погрешностей. Экспериментально эти формулы не проверялись. При $\kappa \geq 4$ и $\omega \geq 2$

$$\Phi \approx \frac{L_b}{L\omega(1+F)}, \quad F = \frac{L_b}{L} \frac{\kappa}{\omega} = \sqrt{\frac{K}{K_b}}.$$

11.3. Измерение температуры поверхности тела при внешнем расположении ИПТ

Оценка методических погрешностей измерения температуры поверхности определяется особенностями ИПТ и их размещением на объекте. Наиболее часто для измерения температуры поверхности используют термпары, плоские термометры сопротивления (проволочные или пленочные), термокарандаши, термокраски, а также плавкие вставки (последние являются индикаторами одноразового действия),

Характерные случаи расположения ИПТ на объекте схематически показаны на рис. 11.4: 1) ИПТ, исключая зону контакта чувствительного элемента с исследуемой поверхностью, полностью располагается вне объекта измерения в окружающей его среде (рис. 11.4, а); 2) ИПТ располагается на поверхности тела или в непосредственной близости от его границы (рис. 11.4, б); 3) ИПТ располагается в толще тела, при этом чувствительный элемент выходит на поверхность или удален от нее на некоторое расстояние (рис. 11.4, в).

Практические приемы уменьшения методических погрешностей измерения сводятся к обеспечению малых размеров и объема ИПТ; малых термических сопротивлений и теплоемкости чувствительного элемента ИПТ; близости степеней черноты и коэффициентов поглощения ИПТ и поверхности исследуемого тела; расположения ИПТ и вы-

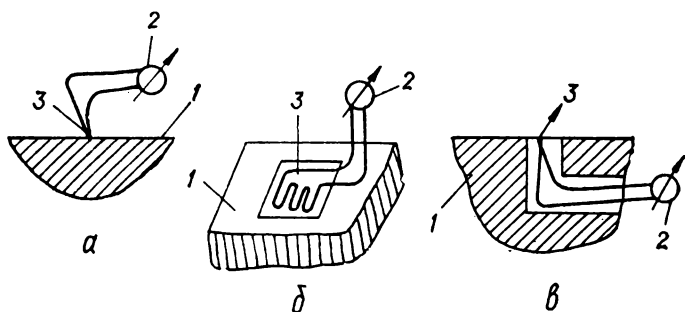


Рис. 11.4. Расположение ИПТ:

а — вне исследуемого тела; б — на поверхности тела; в — внутри тела; 1 — исследуемый объект; 2 — регистрирующий прибор; 3 — термочувствительный элемент.

водов в изотермической зоне; увеличения площади контакта чувствительного элемента с поверхностью.

В исследовательской практике контроль температуры поверхности проводят по схеме, показанной на рис. 11.4, а. Оценку методической погрешности в этом случае можно дать, рассматривая объект измерения как массивное тело (полупространство), а ИПТ — как бесконечно длинный однородный стержень радиусом R . Причина возникновения погрешности измерения Δ_t температуры поверхности тела t_n состоит в том, что в результате теплопроводности вдоль оси x и отвода тепла с боковой поверхности ИПТ в окружающую его среду с температурой t_b измеряемая температура t_s в зоне контакта тел 1 и 2 будет отличаться от действительной температуры поверхности t_n . Качественный ход изменения температуры в массиве $t_0(z)$ вдоль оси z и ИПТ $t_T(x)$ показан на рис. 11.5, а. Теоретический анализ распределения температур в данной системе тел проводился неоднократно.

После установления контакта ИПТ с объектом и наступления стационарного теплового режима погрешность измерения температуры Δ_t оценивается по формуле

$$\Delta_t = t_s - t_n = -\frac{\eta - \omega}{1 + \eta} (t_n - t_b), \quad (11.12)$$

где

$$\eta = \Lambda_9 / \Lambda_0, \quad \omega = \Lambda_{\pi} / \Lambda_0; \quad (11.13)$$

Λ_s — полная тепловая проводимость ИПТ между площадью контакта S_k и окружающей средой; Λ_o — полная тепловая проводимость между глубинными областями тела и площадкой контакта S_k тел

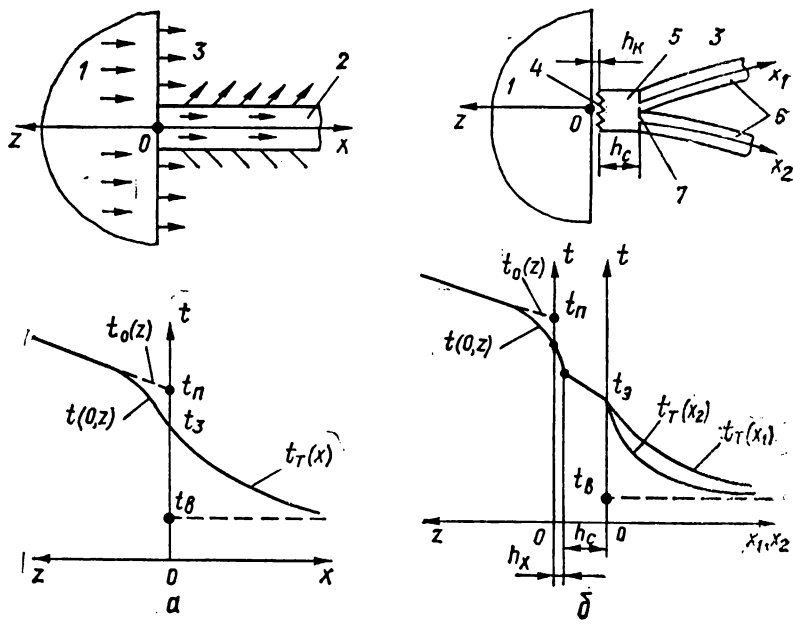


Рис. 11.5. Внешнее расположение ИПТ:

a — упрощенная схема; *b* — в реальных условиях; 1 — объект измерений; 2 — ИПТ; 3 — окружающая среда; 4 — контактное сопротивление; 5 — спай; 6 — термоэлектроды; 7 — плоскость раздела.

l и 2 ; $\Lambda_{\text{п}}$ — полная тепловая проводимость между свободной поверхностью тела l и средой в расчете на площадь $S_{\text{к}}$. Для ИПТ цилиндрической формы радиусом R

$$\Lambda_0 = \frac{3\pi}{8} \frac{\lambda_0}{R} S_3 = \frac{3\pi^2}{8} \lambda_0 R, \quad (11.14)$$

$$\Lambda_0 = \alpha_0 S_3 = \alpha_0 \pi R^2, \quad \Lambda_3 = \sqrt{K_3 \rho_3 S_3 \lambda_3} = \pi R \sqrt{2K_3 \lambda_3 R}, \quad (11.15)$$

где λ_o — коэффициент теплопроводности объекта; p_o и S_o — периметр и площадь поперечного сечения ИПТ; α_o — коэффициент теплоотдачи между телом и средой (см. рис. 11.5, а); λ_s — коэффициент теплопроводности ИПТ; K_s — коэффициент теплопередачи между боковой поверхностью ИПТ и окружающей средой.

Из формулы (11.12) следует, что возможны три случая. При $t_{\pi} > t_{\text{в}}$ и $\eta = \omega$ измеренная температура $t_{\text{э}}$ равна действительной; при $\eta > \omega$ измеренная температура ниже действительной из-за влияния теплоотвода по ИПТ; при $\eta < \omega$ ИПТ оказывает теплоизолирующее воздействие на поверхность и повышает ее температуру. Обычно $\omega < \eta$, поэтому требование малости ошибки измерений для цилиндрического ИПТ сводится к выполнению условия

$$\frac{K_{\text{э}} \lambda_{\text{э}} R^2}{\lambda_0^2} \ll 1. \quad (11.16)$$

В реальных условиях помимо рассмотренных выше факторов на погрешность оказывает влияние несовершенство теплового контакта между ИПТ и телом, а также удаление чувствительного элемента ИПТ от поверхности тела (рис. 11.5, б). С учетом контактного сопротивления и перепада температур в спае вместо формулы (11.12) для оценки погрешности измерения температуры термопарой предлагается следующая формула:

$$\frac{\Delta_t}{t_{\pi} - t_{\text{в}}} = \frac{t_{\text{э}} - t_{\pi}}{t_{\pi} - t_{\text{в}}} = - \left[1 - \frac{(1 + \omega) \frac{\Lambda_{\kappa}}{\Lambda_0}}{\eta + \frac{\Lambda_{\kappa}}{\Lambda_0} \left(\eta + \frac{1 + \Lambda_{\text{э}}/\Lambda_{\text{с}}}{1 + \Lambda_{\text{с.б}}/\Lambda_{\text{с}}} \right)} \right], \quad (11.17)$$

где η и ω находят по (11.13);

$$\Lambda_{\kappa} = \frac{\lambda_{\kappa}}{h_{\kappa}} S_{\kappa} = \frac{\pi \lambda_{\kappa} R_{\kappa}^2}{h_{\kappa}}, \quad (11.18)$$

$$\Lambda_{\text{с}} = \frac{\lambda_{\text{с}}}{h_{\text{с}}} S_{\text{с}} = \frac{\pi \lambda_{\text{с}} R_{\text{с}}^2}{h_{\text{с}}}, \quad \Lambda_{\text{с.б}} = \alpha_{\text{с.б}} p_{\text{с}} h_{\text{с}} = 2\pi \alpha_{\text{с.б}} R_{\text{с}} h_{\text{с}}, \quad (11.19)$$

$$\Lambda_{\text{э}} = \Lambda_{\text{э1}} + \Lambda_{\text{э2}}. \quad (11.20)$$

В выражениях (11.17) — (11.20) Λ_{κ} — полная тепловая проводимость зоны контакта 4; $\Lambda_{\text{с}}$ — то же спая 5 термопары; $\Lambda_{\text{с.б}}$ — то же между боковой поверхностью спая 5 и окружающей средой; $\Lambda_{\text{э}}$ — суммарная тепловая проводимость термоэлектродов 6, собственные проводимости $\Lambda_{\text{э1}}$ и $\Lambda_{\text{э2}}$ которых рассчитывают по формулам вида (11.15); h_{κ} , S_{κ} , R_{κ} и λ_{κ} — толщина, площадь поперечного сечения, радиус и коэффициент теплопроводности зоны контакта; $\alpha_{\text{с.б}}$ — коэффициент теплоотдачи с боковой поверхности спая.

При выводе формулы (11.17) предполагалось, что распределение температур по толщине спая линейное, а термоЭДС термопары генерируется в плоскости раздела спая и термоэлектродов на расстоянии $h = h_{\text{с}} + h_{\kappa}$ от поверхности тела и соответствует температуре $t_{\text{э}}$.

Погрешность, вызванная утечкой тепла по ИПТ, снижается, если увеличить поверхность соприкосновения ИПТ с телом, припаяв чувствительный элемент к тонкой с хорошей теплопроводностью металлической пластинке или диску (рис. 11.6, а). Погрешность измерения

для «дисковых» термопар оценивается по формулам (11.12), (11.17) при замене в них параметра η на η_d :

$$\eta_d = \eta \frac{R}{R_d} \cong 0,85 \frac{\sqrt{2K_3 \lambda_3 R_d}}{\lambda_0}, \quad (11.21)$$

где R и R_d — радиусы термоэлектрода и диска. Погрешность снижается лишь до определенного значения R_d . Дальнейшее его увеличение приводит к появлению воздушных зазоров в зоне контакта между телом и диском, и погрешность измерения вновь возрастает. Для термопар с термоэлектродами диаметром $(0,1 \dots 0,3) \cdot 10^{-3}$ м ориентировочные размеры диска, изготовленного из меди или серебра, следующие: толщина $(0,2 \dots 1,5) \cdot 10^{-3}$ м, диаметр $(1 \dots 6) \cdot 10^{-3}$ м.

Результаты измерения при внешнем расположении ИПТ существенно улучшаются, если его монтаж проводится по схеме, приведенной на рис. 11.6, б. Вытягивая термоэлектроды термопары по поверхности на расстояние $l \geq 12R$, получаем расчетную погрешность измерения, составляющую 5 % максимальной погрешности, оцениваемой по формуле (11.12). Разность между действительной температурой t_n и ее возмущением на расстоянии r от зоны контакта $t(r)$ составляет 5 % Δt , оцениваемой по формуле (11.12) на расстояниях r/R , примерно равных 5,7; 2,7 и 1,4 соответственно при ξ , равном 0, 1; 1 и 10 ($\xi = \alpha_0 R / \lambda_0$). Формулы (11.12), (11.17) получены для массивных объектов, однако их можно применять при оценке погрешностей измерения, если отношение толщины тела h к размеру ИПТ R , т.е. $h/R > 3$ при малых разностях $t_n - t_3$.

Необходимое безразмерное время выдержки (время установления показаний $\tau_{уст}$) ИПТ от момента его установки на объект с равномерным начальным полем температур находится при $a_0 / m_3 R^2 \gg 1$ из уравнения

$$\frac{t_{э, пер}(\tau) - t_b}{t_{э, ст} - t_b} = \frac{1}{1 - \sqrt{\kappa}} \{ 1 - \sqrt{\kappa} \operatorname{erf}(\sqrt{\kappa} z) - \exp[(1 - \kappa) z^2] \operatorname{erfc} z \}, \quad (11.22)$$

где

$$\kappa = \frac{m_3}{m_0}, \quad m_3 = \frac{2K_3}{c_3 \gamma_3 R}, \quad m_0 = \frac{a_0}{\mu^2 R^2}, \quad (11.23)$$

$$\mu = \frac{8}{3\pi} \sqrt{\frac{\lambda_3 c_3 \gamma_3}{\lambda_0 c_0 \gamma_0}}, \quad z = \sqrt{m_0 \tau}. \quad (11.24)$$

В формулах (11.22) — (11.24) a_3 , λ_3 , c_3 , γ_3 и a_0 , λ_0 , c_0 , γ_0 — теплофизические характеристики ИПТ и объекта; $t_{э, ст}$ и $t_{э, пер}(\tau)$ — темпера-

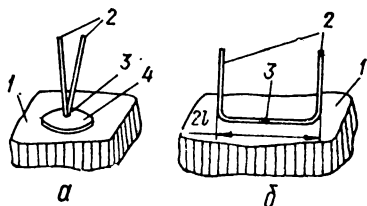


Рис. 11.6. Крепление термопары на поверхности тела:

а — при помощи диска; б — термоэлектроды вытянуты по поверхности; 1 — тело; 2 — термоэлектроды; 3 — спай термопары; 4 — диск.

туры чувствительного элемента ИПТ в установившемся состоянии и в момент времени τ переходного процесса; $\operatorname{erf} z = 1 - \operatorname{erfc} z$ — интеграл вероятностей; $(t_{3, \text{ст}} - t_3(\tau)) / (t_{3, \text{ст}} - t_3) \leq 0,05$ при $z \geq 0,11$; 0,4; 1,1; 2,3 и 2,7 соответственно для λ , равного 100; 10; 1; 0,1 и 0,01.

Погрешность измерения температуры проволок и тонких пластин с помощью термопар при медленном ее изменении определяется зависимостью

$$\Delta t = t_3 - t_0 = - (t_0 - t_3) \frac{\eta}{1 + \eta}, \quad (11.25)$$

где t_3 — измеренная температура в зоне контакта спая термопары с исследуемым объектом (пластина или проволока); t_0 — действительная температура объекта. Параметр η находится по первой из формул (11.13), в которой Λ_3 , Λ_{31} и Λ_{32} оцениваются по (11.20) и (11.15). Λ_0 рассчитывается по следующим формулам: для проволоки

$$\lambda_0 = 2\pi R_{\text{пр}} \sqrt{2\alpha_0 \lambda_0 R_{\text{пр}}}, \quad (11.26)$$

где α_0 , λ_0 и $R_{\text{пр}}$ — соответственно коэффициент теплоотдачи, коэффициент теплопроводности и радиус проволоки; для пластины

$$\Lambda_0 = 2\pi \lambda_0 h_0 v \frac{K_1(v)}{K_0(v)} \approx \frac{2\pi \lambda_0 h_0}{\ln\left(1 + \frac{1}{v}\right)}, \quad (11.27)$$

где K_0 и K_1 — модифицированные функции Бесселя,

$$v = \sqrt{\frac{2\alpha_0}{\lambda_0 h_0}} R_0, \quad R_0 = \sqrt{R_{31}^2 + R_{32}^2}, \quad (11.28)$$

α_0 , λ_0 , h_0 — соответственно коэффициент теплоотдачи, коэффициент теплопроводности и толщина пластины; R_0 — эффективный радиус зоны контакта, определяемый по (11.28) через радиусы термоэлектродов термопары R_{31} и R_{32} .

Методическая погрешность применяемых на практике ИПТ для измерения температуры поверхности может существенно превышать их инструментальные погрешности и выходить за пределы требуемой точности измерений. При этих условиях, ввиду недостаточной надежности расчетной оценки погрешности, особую актуальность приобретает разработка методов градуировки термометров, предназначенных для измерения температуры поверхности твердых тел, а также создание соответствующей образцовой и рабочей поверочной аппаратуры.

Вызываемое ИПТ температурное возмущение объекта можно значительно уменьшить, помещая вблизи чувствительного элемента (например, спая термопары) миниатюрный электрический нагреватель и с его помощью компенсируя тепловой поток по ИПТ от контролируемого участка поверхности тела. Принципиальные схемы термопар с нагревателями показаны на рис. 11.7. В варианте I момент компенсации и требуемую мощность электрического нагревателя устанавливают при быстром перемещении термопары вдоль поверхности. Если при смещении спая показания термопары не изменяются, то мощность нагревателя подобрана правильно. В вариантах II и III мощность нагревателя изменяют до тех пор, пока сигнал от дифференциальной термопары (выводы 2 и 3 в схеме II или выводы 1 и 4 при закороченных

выводах 2 и 3 в схеме III) не будет равен нулю. Для термопар расстояние h от поверхности объекта измерения до нагревателя колеблется в пределах $(1...6) \cdot 10^{-3}$ м, а расстояние δ от поверхности до второго спая равно $(0,2...1) \cdot 10^{-3}$ м; диаметр термоэлектродов — $(0,1...0,4) \times 10^{-3}$ м. Применение ИПТ с компенсацией теплоотвода позволяет снизить погрешность измерения температуры неметаллических поверхностей до $0,5...3$ К при нагреве этих объектов над средой на $50...400$ К. В течение полувека предложены и исследованы несколько разновидностей ИПТ с компенсацией теплоотвода. В последних реализациях использованы электронные компенсирующие устройства.

Другой метод заключается в использовании для измерения температуры поверхности двух ИПТ, имеющих различные размеры или теплофизические свойства. Их показания $t_{\varepsilon 1}$ и $t_{\varepsilon 2}$ связаны с действительной температурой поверхности t_n и температурой окружающей среды t_b соотношением

$$t_n - t_b = (t_{\varepsilon 1} - t_{\varepsilon 2}) \frac{1 - K}{1 - K \frac{t_{\varepsilon 1} - t_{\varepsilon 2}}{t_{\varepsilon 2} - t_b}} \quad (11.29)$$

Входящий в уравнение коэффициент K для цилиндрических ИПТ определяется с учетом (11.13) — (11.15) по формуле

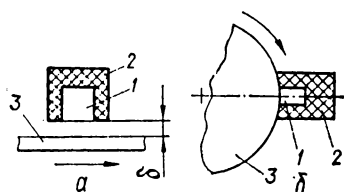


Рис. 11.8. Схема установки непогружаемых ИПТ:

a — бесконтактный способ; b — контактный способ; 1 — ИПТ; 2 — теплоизолятор; 3 — контролируемый объект.

$$K = \frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\Lambda_1}{\Lambda_2} = \sqrt{\frac{K_{\varepsilon 1} \lambda_{\varepsilon 1} R_{\varepsilon 1}}{K_{\varepsilon 2} \lambda_{\varepsilon 2} R_{\varepsilon 2}}}$$

Коэффициент K , слабо зависящий от уровня температуры исследуемого тела, находят по результатам калибровочного опыта при одном известном значении перегрева $t_n - t_b$. Расчет погрешностей при расположении измерителей по схеме, приведенной на рис. 11.4, а, значительно усложняется для объектов ограниченных размеров.

Для контроля и автоматического регулирования температуры поверхности промышленных объектов (неподвижных или движущихся) разработана группа так называемых непогружаемых ИПТ. Упрощенные модели и способы их установки на объект показаны на рис. 11.8. При бесконтактном способе измерения (рис. 11.8, а) ИПТ располагается на небольшом ($\delta = 0,2...2$ мм) фиксированном расстоянии от объекта. Постоянство прижима при контактном способе (рис. 11.8, б) обеспечивается специальным устройством. Теплоизолятор уменьшает влияние теплоотвода и температурного возмущения контролируемого объекта.

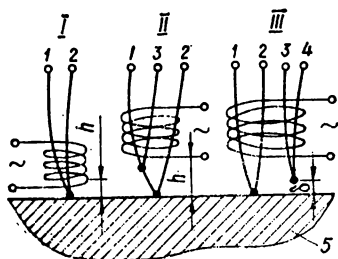


Рис. 11.7. Термопарные ИПТ с компенсацией теплоотвода:

1, 2 — электроды основной термопары; 3, 4 — электроды вспомогательной термопары; 5 — контролируемая поверхность.

11.4. Измерение температуры поверхности массивных объектов ИПТ

ИПТ малой толщины — ИПТ, конструктивно оформленные в виде пластинок или пленок (обычно прямоугольной формы), длина и ширина которых намного больше их толщины. Схематически такие ИПТ показаны на рис. 11.9. ИПТ прикрепляют (приклеивают, приваривают, напыляют) на контролируемую поверхность. Поскольку любой пластинчатый ИПТ, как бы тонок он ни был, обладает собственными тепловым сопротивлением и теплоемкостью, его температура будет отличаться от действительной температуры свободной поверхности тела.

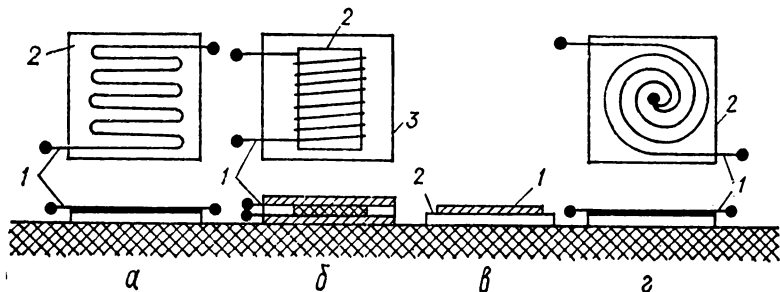


Рис. 11.9. Пластинчатые ИПТ для измерения температуры поверхности: а — проволочный термометр сопротивления, наклеиваемый на подложку; б — то же, намотанный на пластинку и закрытый с двух сторон; в — полупроводниковый термометр сопротивления (болومتر), напыленный на подложку или непосредственно на исследуемое тело; г — термопара, электроды которой наклеиваются на пластинку или наносятся путем электролитического осаждения.

Формальный анализ методических погрешностей измерения нестационарных температур может быть сделан на основе решения двух задач: теплообмена исследуемого тела с окружающей средой; теплообмена системы «ИПТ — тело» с той же средой.

Целесообразно выделить два характерных случая, когда объектом изучения является массивное тело (полупространство) или неограниченная стенка заданной толщины (см. параграф 11.5). Учитывая конструктивное оформление ИПТ, распределение температуры в нем, а также в объекте можно приближенно принять одномерным. При этих допущениях получают относительно простые по структуре аналитические выражения для оценки величины погрешностей.

Пусть массивный объект и система «ИПТ — объект» (рис. 11.10) подвержены воздействию тепловых потоков удельной плотностью $q(\tau)$ и $q_0(\tau)$ или находятся в конвективно-лучистом теплообмене со средой, имеющей температуру $t(\tau)$. Коэффициенты теплоотдачи α_0 и α_1 постоянны во времени; начальное распределение температуры в объекте и ИПТ равномерное. Начальная температура принимается равной нулю или выбирается за уровень отсчета температуры. Распределение температур в свободном объекте, а также в системе «объект—ИПТ» соответственно характеризуется функциями $t_0(x, \tau)$, $t(x, \tau)$ и $t_1(z, \tau)$.

Если при наложении ИПТ падающий на поверхность объекта тепловой поток не изменяется (одинаковые терморрадиационные характеристики ИПТ и объекта), т. е. $q_3(\tau) = q(\tau)$, то справедливо соотношение

$$T_3(z, s) = Y_{t, q} T_0(0, s), \quad (11.30)$$

непосредственно связывающее изображения $T_3(z, s)$ и $T_0(0, s)$ температуры ИПТ $t_3(z, \tau)$ и действительной температуры $t_0(0, \tau)$ поверхности тела. Передаточная функция имеет вид

$$Y_{t, q} = \frac{\operatorname{ch} \beta Z + \eta \operatorname{sh} \beta Z}{\operatorname{ch} \beta + \frac{1}{\eta} \operatorname{sh} \beta}, \quad (11.31)$$

где

$$\beta = K_3 \sqrt{s} = \sqrt{\frac{s}{a_3}} L_3, \quad K_3 = \frac{L_3}{\sqrt{a_3}}, \quad Z = \frac{z}{L_3}, \quad (11.32)$$

$$\eta = \frac{b_0}{b_3} = \sqrt{\frac{\lambda_0 c_0 \gamma_0}{\lambda_3 c_3 \gamma_3}}; \quad (11.33)$$

s — параметр преобразования Лапласа; L_3 — толщина ИПТ; b_0 и b_3 — коэффициенты тепловой активности объекта и термоприемника; a, λ, c и γ — теплофизические характеристики; индексы 0 и 3 относятся соответственно к объекту и ИПТ. Чувствительный элемент может располагаться внутри или на поверхности ИПТ, т. е. координата z или относительная координата Z его размещения принимают в (11.31) различные значения ($0 \leq Z \leq 1$) в зависимости от конструктивных особенностей пластинчатого ИПТ.

Если теплообмен тела и системы со средой (см. рис. 11.10) осуществляется конвективно-лучистым путем, т. е.

$$\left. \begin{aligned} q(\tau) &= \alpha_0 [t(\tau) - t_0(0, \tau)] \\ q_3(\tau) &= \alpha_3 [t(\tau) - t_3(0, \tau)] \end{aligned} \right\}, \quad (11.34)$$

то вместо (11.30) и (11.31) получим

$$T_3(z, s) = Y_{t, \alpha} T_0(0, s), \quad (11.35)$$

где

$$Y_{t, \alpha} = \frac{\operatorname{ch} \beta Z + \eta \operatorname{sh} \beta Z}{\operatorname{ch} \beta + \frac{1}{\eta} \frac{\beta + \zeta_3 \eta}{\beta + \zeta_3 / \eta} \operatorname{sh} \beta}, \quad \zeta_3 = \frac{\alpha_3 L_3}{\lambda_3}. \quad (11.36)$$

Уравнения (11.30), (11.31), (11.35) и (11.36) позволяют анализировать методические погрешности в различных вариантах измерения темпе-

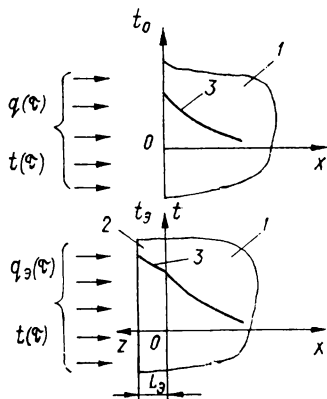


Рис. 11.10. Система «плоский ИПТ — массивное тело»: 1 — исследуемое тело; 2 — ИПТ; 3 — профили температур.

ратуры поверхности с разной степенью приближения расчетных зависимостей.

Ограничиваясь в разложении передаточной функции членами разложения не выше β^2 , из (11.31) получаем

$$Y_{t, q} = \frac{1 + \eta Z \beta + \frac{1}{2} Z^2 \beta^2}{1 + \frac{1}{\eta} \beta + \frac{1}{2} \beta^2} \approx \frac{1}{1 + \frac{1}{\eta} (1 - \eta^2 Z) \beta + B_{\beta, q} \beta^2} \approx \\ \approx 1 - \frac{1}{\eta} (1 - \eta^2 Z) \beta + B_{\beta, q} \beta^2. \quad (11.37)$$

Используя (11.37), (11.30) и переходя к оригиналам, находим следующие приближенные соотношения, определяющие методическую погрешность измерения температуры поверхности $\Delta_t(z, \tau)$ в зависимости от ее действительной $t_o(0, \tau)$ или измеренной температуры:

$$\Delta_t(z, \tau) = t_o(0, \tau) - t_{\beta}(z, \tau) \approx \frac{K_{\beta}}{\eta} (\eta^2 Z - 1) L^{-1} \{ \sqrt{s} T_{\beta}(z, s) \} - \\ - K_{\beta}^2 B_{\beta, q} \frac{dt_{\beta}(z, \tau)}{d\tau} \approx \frac{K_{\beta}}{\eta} (\eta^2 Z - 1) L^{-1} \{ \sqrt{s} T_o(0, s) \} + \\ + K_{\beta}^2 B_{\beta, q} \frac{dt_o(0, \tau)}{d\tau}, \quad (11.38)$$

где символ L^{-1} означает операцию обратного преобразования Лапласа выражений $\sqrt{s} T_{\beta}(z, s)$ или $\sqrt{s} T_o(0, s)$;

$$B_{\beta, q} = \frac{1}{2} (1 - Z^2) - Z (1 - \eta^2 Z), \quad B_{\beta, q} = \frac{1}{\eta^2} - Z + \frac{1}{2} (Z^2 - 1). \quad (11.39)$$

Первым из уравнений (11.38) предпочтительно пользоваться при $\eta < 1$, вторым — при $\eta > 1$.

Если температура $t_{\beta}(z, \tau)$ или $t_o(0, \tau)$ изменяется, в частности, с течением времени по степенному закону вида

$$t_{\beta}(z, \tau) = A \tau^m \text{ или } t_o(0, \tau) = A \tau^m \text{ при } m \geq 0, \quad (11.40)$$

то из уравнений (11.38) после преобразований получаем

$$\Delta_t(z, \tau) = t_{\beta}(z, \tau) - t_o(0, \tau) \approx \\ \approx \frac{1}{\eta} (\eta^2 Z - 1) C(m) \frac{t_{\beta}(z, \tau)}{\sqrt{\tau}} - B_{\beta, q} \frac{t_{\beta}(z, \tau)}{\tau} \approx \\ \approx \frac{1}{\eta} (\eta^2 Z - 1) C(m) \frac{t_o(0, \tau)}{\sqrt{\tau}} + B_{\beta, q} \frac{t_o(0, \tau)}{\tau}, \quad (11.41)$$

где $C(m)$ — некоторое число, определяемое через гамма-функции; $\tau_{Fo_{\beta}}$ — безразмерное время (число Фурье), отсчитываемое от начала процесса ($\tau = 0$):

$$\tau_{Fo_{\beta}} = \frac{a_{\beta} \tau}{L_{\beta}^2} = \frac{\tau}{K_{\beta}^2}, \quad C(m) = \frac{\Gamma(m+1)}{\Gamma\left(m + \frac{1}{2}\right)}. \quad (11.42)$$

При $m = 0; 1/2; 1$ и n (n — целое число)

$$C(m) = \frac{1}{\sqrt{\pi}}; \quad \frac{\sqrt{\pi}}{2}; \quad \frac{2}{\sqrt{\pi}}; \quad \frac{2^n n!}{1 \cdot 3 \cdot 5 \dots (2n-1) \sqrt{\pi}}. \quad (11.43)$$

Из (11.41) следует, что если воздействие теплового потока $q(\tau)$ приводит к монотонному увеличению измеренной температуры по закону вида (11.40), то относительная погрешность измерения температуры поверхности $\Delta_t(z, \tau)/t_s(z, \tau)$ будет постепенно уменьшаться по мере увеличения критерия Fo_s . Требуемое время τ , начиная с которого относительная погрешность измерения температуры поверхности не превысит заданной, находят непосредственно из (11.41).

В зависимости от свойств ИПТ и объекта (отношение тепловых активностей η) и расположения чувствительного элемента (значение координаты Z) методическая погрешность $\Delta_t(z, \tau)$ может быть как положительной, так и отрицательной, т. е. измеренная температура $t_s(z, \tau)$ может опережать действительную температуру поверхности $t_o(0, \tau)$ или отставать от нее. В частном случае, при расположении чувствительного элемента, удовлетворяющего требованию $Z = 1/\eta^2$, первые слагаемые уравнений (11.38) и (11.41) обращаются в нуль, и динамическая погрешность приближенно оценивается только вторыми слагаемыми этих уравнений.

Если теплообмен объекта определяется воздействием температуры среды $t(\tau)$, то для оценки погрешностей используют выражения (11.35), (11.36). Приближенно

$$Y_{t, \alpha} \approx \frac{1}{1 + \eta(1-Z)\beta + B_{s, \alpha}\beta^2} \approx 1 - \eta(1-Z)\beta - B_{o, \alpha}\beta^2. \quad (11.44)$$

Подставляя выражение (11.44) в (11.35), находим искомые уравнения взаимосвязи погрешности $\Delta_t(z, \tau)$ с измеренной $t_s(z, \tau)$ или действительной $t_o(0, \tau)$ температурами:

$$\begin{aligned} \Delta_t(z, \tau) &= t_s(z, \tau) - t_o(0, \tau) \approx \\ &\approx K_s \eta (Z-1) L^{-1} \{ \sqrt{s} T_s(z, s) \} - B_{s, \alpha} K_s \frac{dt_s(z, \tau)}{d\tau} \approx \\ &\approx K_s \eta (Z-1) L^{-1} \{ \sqrt{s} T_o(0, s) \} - B_{o, \alpha} K_s \frac{dt_o(0, \tau)}{d\tau}, \end{aligned} \quad (11.45)$$

$$\text{где} \quad \left. \begin{aligned} B_{s, \alpha} &= \frac{1}{2} (1 - Z^2) - \eta^2 Z (1 - Z) + \frac{1}{\xi_s} (1 - \eta^2), \\ B_{o, \alpha} &= \frac{1}{2} (1 - Z^2) - \eta^2 (1 - Z) + \frac{1}{\xi_s} (1 - \eta^2). \end{aligned} \right\} \quad (11.46)$$

Первое из выражений (11.45) обеспечивает более высокую точность оценок при $\eta < 1$ и $Z \approx 1$, а второе — соответственно при $\eta > 1$ и $Z \approx 0$.

Если температуры $t_s(z, \tau)$ или $t_o(0, \tau)$ изменяются по закону (11.40), то из выражений (11.45) получаем

$$\begin{aligned} \Delta_t(z, \tau) &= t_s(z, \tau) - t_o(0, \tau) \approx \\ &\approx \eta (Z-1) C(m) \frac{t_s(z, \tau)}{\sqrt{Fo_s}} - m B_{s, \alpha} \frac{t_s(z, \tau)}{Fo_s} \approx \\ &\approx \eta (Z-1) C(m) \frac{t_s(0, \tau)}{\sqrt{Fo_s}} - m B_{o, \alpha} \frac{t_o(0, \tau)}{Fo_s}. \end{aligned} \quad (11.47)$$

В уравнениях (11.47) $C(m)$ и Fo_3 определяют по (11.42) и (11.43), а коэффициент K_3 — по (11.32). Из (11.45) и (11.47) следует, что при $Z = 1$, т. е. при расположении чувствительного элемента на стороне нагрева, первая составляющая погрешности, пропорциональная $L^{-1}\{\sqrt{s}T_3(z, s)\}$ и $L^{-1}\{\sqrt{s}T_0(0, s)\}$, исчезает, и погрешность измерения будет линейной функцией скорости изменения во времени температур $t_3(z, \tau)$ и $t_0(0, \tau)$.

Если воздействие на объект теплового потока $q(\tau)$ или температуры среды $t(\tau)$ периодически изменяется во времени, то это приводит к периодическому в квазиустановившемся режиме изменению температуры поверхности объекта $t_0(0, \tau)$ и показаний ИПТ $t_3(z, \tau)$. Для оценки динамики процесса измерений используют амплитудные и фазовые частотные характеристики, получаемые на основе выражений (11.31) и (11.36). Ограничиваясь в разложении передаточной функции (11.31) слагаемыми степени не выше s , находим

$$Y_{t, q} \approx \frac{1 + B_1 \sqrt{s}}{1 + A_1 \sqrt{s} + A_2 s}, \quad (11.48)$$

где

$$B_1 = K_3 \eta Z, \quad A_1 = \frac{K_3}{\eta}, \quad A_2 = \frac{1}{2} (1 - Z^2) K_3^2. \quad (11.49)$$

Заменяя в (11.48) s на $i\omega$, после преобразований получаем

$$A(\omega) = \frac{A_3}{A_t} = \left(\frac{1 + \sqrt{2} B_1 \sqrt{\omega} + B_1^2 \omega}{1 + \sqrt{2} A_1 \sqrt{\omega} (1 + A_2 \omega) + A_1^2 \omega + A_2^2 \omega^2} \right)^{1/2}, \quad (11.50)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \left[- \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} (A_1 - B_1 + B_1 A_2 \omega) \sqrt{\omega} + A_2 \omega}{1 + \frac{1}{\sqrt{2}} (A_1 + B_1 + B_1 A_2 \omega) \sqrt{\omega} + A_1 B_1 \omega} \right]. \quad (11.51)$$

Уравнение (11.50) определяет амплитудно-частотную характеристику системы «ИПТ — объект», показывающую отношение амплитуды A_3 колебаний температуры $t_3(z, \tau)$ чувствительного элемента ИПТ к амплитуде A_t изменения температуры $t_0(0, \tau)$ поверхности объекта в зависимости от циклической частоты ω . Фазочастотная характеристика (11.51) определяет сдвиг колебаний температуры ИПТ по отношению к температуре тела.

Если исходным тепловым воздействием на объект является температура среды $t(\tau)$, то выражение (11.36) для $Y_{t, \alpha}$ можно при любых η и $\eta^2 Z < 2$ приближенно представить в виде, аналогичном (11.48). Для этого случая амплитудно- и фазочастотные характеристики рассчитывают по уравнениям (11.50), (11.51), в которых коэффициенты B_1 , A_1 и A_2 определяются по формулам

$$B_1 = K_3 \eta \left(Z + \frac{1}{\epsilon_3} \right), \quad A_1 = K_3 \eta \left(1 + \frac{1}{\epsilon_3} \right), \quad A_2 = K_3^2 \left[\frac{1}{2} (1 - Z^2) + \frac{1}{\epsilon_3} (1 - \eta^2 Z) \right]. \quad (11.52)$$

Соотношения (11.37) — (11.51) представляют собой первые приближения решаемой задачи, определяющие методическую погрешность при относительно медленных изменениях температуры во времени и в моменты времени, далекие от начального. Учет высокочастотных (высокоскоростных) составляющих погрешности следует проводить, пользуясь более строгими аппроксимациями передаточных функций (11.31) и (11.36).

11.5. Измерение температуры поверхности стенок плоскими (пластинчатыми) ИПТ

Погрешность измерения стационарной температуры стенки Пусть стенка (рис. 11.11, а), имеющая толщину L_0 и коэффициент теплопроводности λ_0 , разделяет две среды 1 и 2 с постоянными температурами t_1 и t_2 . Коэффициенты конвективно-лучистой теплоотдачи между средами и поверхностями стенки равны α_1 и α_2 . Измерению подлежат действительные температуры поверхностей стенок, обозначенные $t_{n,1}$ и $t_{n,2}$. В качестве ИПТ применяются плоские ПТ толщиной L_3 , имеющие коэффициент теплопроводности λ_3 и закрепленные соответственно на левой (рис. 11.11, б) или правой (рис. 11.11, в) поверхностях стенки. Чувствительный элемент ИПТ размещается в плоскости ПТ с координатой z , причем $0 \leq z \leq 1$. Показания ИПТ $t_3(z)$ будут отличаться от искомых температур поверхностей стенки $t_{n,1}$ и $t_{n,2}$, поскольку ИПТ, обладая собственным термическим сопротивлением L_3/λ_3 и изменяя коэффициенты теплоотдачи α_1 на $\alpha_{3,1}$ (или α_2 на $\alpha_{3,2}$), изменяет и первоначальный тепловой поток q через стенку.

Анализ этой задачи приводит к следующим зависимостям для оценки погрешностей измерения стационарных температур стенки: при расположении ИПТ по схеме, показанной на рис. 11.11, б,

$$\frac{\Delta t}{t_1 - t_{n1}} = \frac{t_3(z) - t_{n1}}{t_1 - t_{n1}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{31}} + \frac{L_3 - z}{\lambda_3}} \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{L_0}{\lambda_0} + \frac{1}{\alpha_2}}; \quad (11.53)$$

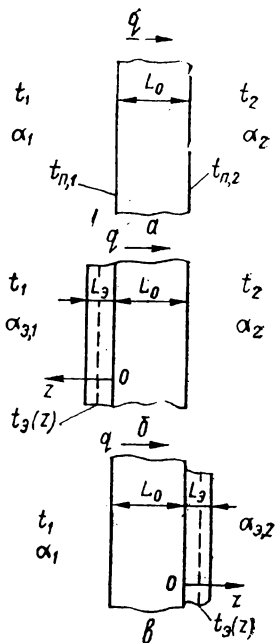


Рис. 11.11. Расположение ИПТ на стенке:

а — стенка; б, в — стенка с закрепленным на левой и правой поверхности ИПТ.

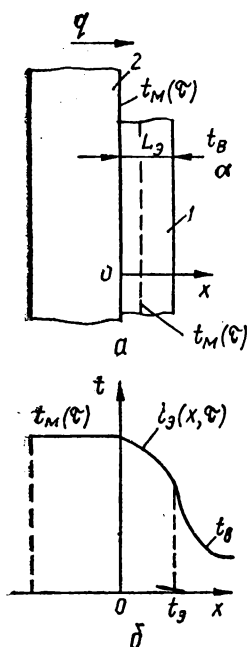


Рис. 11.12. Система плоский ИПТ (1) — металлическая стенка (2):

a — расположение ИПТ;
b — профиль температур.

нок ИПТ, качественных оценок динамики измерительного процесса такие характеристики полезны.

Пусть плоский ИПТ 1 (рис. 11.12) с заданными теплофизическими свойствами λ_3 , c_3 , γ_3 , a_3 и толщиной L_3 используется для измерения температуры поверхности объекта 2 (массивное тело или стенка). Объект находится в теплообмене со средой с заданной температурой $t_B = \text{const}$, интенсивность теплообмена определяется коэффициентом теплоотдачи α . Нестационарная температура поверхности объекта $t_n(\tau)$ не изменяется при наложении на него пластинчатого ИПТ. Искажение поля температур в объекте под ИПТ отсутствует при условии, что объект обладает высокой теплопроводностью (изготовлен из металла) и сохраняет ранее существовавшую равномерность поля температур.

Температурное поле пластинчатого ИПТ $t_3(x, \tau)$ определяется его контактом с объектом и теплообменом со средой, имеющей температуру t_B :

при расположении ИПТ по схеме, показанной на рис. 11.11, в,

$$\frac{\Delta t}{t_{n2} - t_2} = \frac{t_3(z) - t_{n2}}{t_{n2} - t_2} = \frac{\frac{L_3 - z}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_{32}}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{L_0}{\lambda_0} + \frac{1}{\alpha_2}} - 1. \quad (11.54)$$

Из (11.53) и (11.54) следуют разнообразные частные случаи. Например, в жидких средах или при одинаковых терморadiационных характеристиках ИПТ и стенки $\alpha_1 \approx \alpha_{31}$, $\alpha_2 \approx \alpha_{32}$; в газовых средах обычно $1/\alpha_1 \gg L_3/\lambda_3$, $1/\alpha_2 \gg L_3/\lambda_3$ и т. п.

Для толстых стенок начинает проявляться эффект «выравнивающего» действия стенки на температуру ее поверхности непосредственно под ИПТ, уменьшающий погрешность, вычисляемую по формулам (11.53) и (11.54).

Динамические характеристики пластинчатых ИПТ. Динамические характеристики ИПТ, применяемых для измерения температуры твердых тел, не имеют такого решающего значения, как аналогичные характеристики ИПТ, используемых для контроля температуры текучих сред. Здесь комплексно приходится учитывать взаимное влияние ИПТ и объекта. Однако для сравнительных оценок

$$T_3(x, s) - \frac{t_B}{s} = Y(p, s) \left[T_M(s) - \frac{t_B}{s} \right], \quad (11.55)$$

где $T_3(x, s)$ и $T_M(s)$ — изображения температуры ИПТ $t_3(x, \tau)$ и объекта $t_M(\tau)$; передаточная функция ИПТ

$$Y(\rho, s) = \frac{\zeta \operatorname{sh} \beta (1 - \rho) + \beta \operatorname{ch} \beta (1 - \rho)}{\zeta \operatorname{sh} \beta + \beta \operatorname{ch} \beta}, \quad (11.56)$$

где $\zeta = \alpha L_3 / \lambda_3$, $\beta = \sqrt{s/a_3} L_3$, $\rho = x/L_3$. Чувствительный элемент ИПТ располагается в плоскости x , где $0 \leq x \leq L_3$, или $0 \leq \rho \leq 1$ (см. рис. 11.12).

В первом приближении (при малом критерии ζ) взамен (11.56) можно использовать передаточную функцию

$$Y(\rho, s) \approx \frac{y_{\text{ст}}}{1 + \varepsilon s}, \quad (11.57)$$

передаточный коэффициент которой, определяющий статическую погрешность ИПТ, определяется формулой

$$y_{\text{ст}} = \frac{1 + (1 - \rho) \zeta}{1 + \zeta}. \quad (11.58)$$

Параметр

$$\varepsilon = \frac{L_3^2}{2a_3} \left[\frac{1 + \frac{1}{3} \zeta}{1 + \zeta} - (1 - \rho)^2 \frac{1 + \frac{1}{3} (1 - \rho) \zeta}{1 + (1 - \rho) \zeta} \right] \quad (11.59)$$

в первом приближении является показателем тепловой инерции пластинчатого теплоприемника и зависит, помимо конструктивных параметров L_3 и a_3 , от интенсивности теплообмена ИПТ с внешней средой, координаты ρ размещения чувствительного элемента. При $\zeta \rightarrow 0$ (теплоизолированный от среды ИПТ) и $\zeta \rightarrow \infty$ из формулы (11.59) получаем

$$\varepsilon_0 = \varepsilon \Big|_{\zeta=0} = \frac{L_3^2}{2a_3} [1 - (1 - \rho)^2], \quad \varepsilon_\infty = \varepsilon \Big|_{\zeta=\infty} = \frac{L_3^2}{6a_3} [1 - (1 - \rho)^2]. \quad (11.60)$$

В первом приближении переходная характеристика ИПТ, определяющая изменение его температуры от начальной t , до стационарной $t_{3, \text{ст}}(x)$, при $t_M = \text{const}$ находится обратным преобразованием выражений (11.55), (11.57):

$$\frac{t_{3, \text{пер}}(x, \tau) - t_B}{t_{3, \text{ст}}(x) - t_B} = 1 - e^{-\tau/\varepsilon}, \quad (11.61)$$

где

$$t_{3, \text{ст}}(x) - t_B = y_{\text{ст}}(t_M - t_B). \quad (11.62)$$

На основе (11.55) и (11.57) методическая погрешность измерения температуры объекта $t_M(\tau)$ оценивается по следующим зависимостям:

$$\begin{aligned} \Delta_t = t_3(x, \tau) - t_M(\tau) &\approx (y_{\text{ст}} - 1) [t_M(\tau) - t_B] - y_{\text{ст}} \varepsilon \frac{dt_M(\tau)}{d\tau} \approx \\ &\approx \left(1 - \frac{1}{y_{\text{ст}}}\right) [t_3(x, \tau) - t_B] - \frac{\varepsilon}{y_{\text{ст}}} \frac{dt_3(x, \tau)}{d\tau}. \end{aligned} \quad (11.63)$$

Более строгие оценки даются на основе передаточной функции (11.56) и ее лучших, по сравнению с (11.57), аппроксимаций.

В соответствии с (11.57) частотные характеристики ИПТ имеют вид

$$A(\omega) = \frac{U_T}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \omega^2}}, \quad \varphi(\omega) = -\operatorname{arctg}(\omega \varepsilon), \quad (11.64)$$

где ω — циклическая частота изменения температуры.

11.6. Измерение температуры поверхности при расположении ИПТ внутри тела

В исследовательской практике и промышленных измерениях температуры используются различные варианты размещения ИПТ внутри или около поверхности тела. Методические погрешности в этих случаях из-за сложности анализа исследованы недостаточно подробно. Ниже приведены наиболее характерные расположения измерителей и расчетные соотношения для оценки погрешностей.

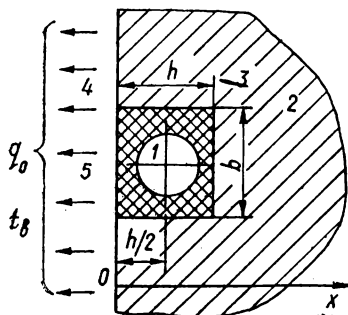


Рис. 11.13. Схема расположения ИПТ в пазу на поверхности тела:

1 — термопара; 2 — исследуемое тело; 3, 5 — замазка; 4 — окружающая среда.

Погрешность измерения температуры Δ_t поверхности определяется смещением термопары на величину $h/2$ от поверхности и перераспределением тепловых потоков в области паза, вызванных различием λ_0 , λ_3 и геометрическими размерами — глубиной h и шириной b паза. Невыраженное распределение температур в теле подчиняется прямой зависимости

$$t(x) = t_n + \frac{q_0}{\lambda_0} x, \quad q_0 = \alpha_0 (t_0 - t_b), \quad (11.65)$$

где x — расстояние от поверхности; t_n — действительная температура поверхности тела; c_0 — удельный тепловой поток через поверхность; α_0 — коэффициент теплообмена тела со средой; t_b — температура окружающей среды.

ПТ (термопара) в пазу на поверхности тела. Схема размещения цилиндрического ИПТ показана на рис. 11.13. Прямоугольный паз (длинная канавка), в которой располагается термопара, заполняется клеем, пастой или цементом. Иногда сверху термоэлектроды термопары дополнительно закрываются металлической фольгой. Детального решения этой задачи нет. Аналитическая и численная оценка в предположении, что паз заполнен веществом с нулевой теплопроводностью, а ИПТ имеет пренебрежимо малое сечение и располагается по отношению к потоку на дне паза, дана в статьях В. Е. Минашина. Если коэффициент теплопроводности λ_0 исследуемого тела превышает коэффициент теплопроводности λ_3 замазки (зоны 3 и 5 на рис. 11.13), систематическая погрешность измерения температуры Δ_t поверхности определяется смещением термопары на величину $h/2$ от поверхности и перераспределением тепловых потоков в области паза, вызванных различием λ_0 , λ_3 и геометрическими размерами — глубиной h и шириной b паза. Невыраженное распределение температур в теле подчиняется прямой зависимости

В предположении, что 1) характер изменения температуры на боковых стенках паза подчиняется зависимостям (11.65); 2) распределение температур по сечению ИПТ равномерное; 3) термопара занимает центральное положение внутри паза, уравнение для оценки статической погрешности измерения температуры поверхности имеет вид

$$\Delta_t = t_3 - t_n = -A(t_n - t_b) = \frac{A}{A-1}(t_3 - t_b), \quad (11.66)$$

$$\text{где } A = \frac{1 - \varphi_0(1 + \kappa)}{1 + \mu(1 + \kappa)}; \quad \mu = 1 + \frac{2h}{b}; \quad \varphi = 1 + \frac{h}{b}; \quad \zeta_0 = \frac{\alpha_0 h}{\lambda_0},$$

$$\zeta_3 = \frac{\alpha_0 h}{\lambda_3};$$

$$\kappa = \frac{1 + \mu}{\mu} \frac{\varphi^2}{\zeta_3} \frac{\left[1 + \frac{\pi d}{2(b+h)}\right]^2}{1 - \frac{\pi d^2}{4bh}}; \quad (11.67)$$

t_3 — температура ИПТ (измеренная температура); d — диаметр ИПТ.

Если температура поверхности объекта $t_n(\tau)$ нестационарна, то динамическая составляющая $\Delta_{\text{дин}}(\tau)$ погрешности измерений приближенно определяется по формуле

$$\Delta_{\text{дин}}(\tau) = t_3(\tau) - t_n(\tau) = (\varepsilon_0 - \varepsilon_3) \frac{dt_3(\tau)}{d\tau}, \quad (11.68)$$

где

$$\varepsilon_3 = \frac{4}{\lambda_3} \left(c_3 \gamma_3 + \frac{c_3 \gamma_3}{\frac{4bh}{\pi d^2} - 1} \right) \left(\frac{bh - \frac{\pi d^2}{4}}{2(b+h) + \pi d} \right)^2,$$

$$\varepsilon_0 = \frac{(b+h)^2 c_0 \gamma_0}{8\pi^2 \lambda_0}, \quad (11.69)$$

а через c и γ с соответствующим индексом 0 , 3 и z обозначены удельная теплоемкость и плотность материала тела, ИПТ, замазки.

При практической реализации данного способа измерений желательно, чтобы глубина и ширина паза не превышали 0,2...0,8 мм. Замазка выбирается с относительно высокой теплопроводностью. Чувствительный элемент по возможности чеканится или приваривается к исследуемой поверхности. Для непрозрачных объектов с высокой степенью черноты поверхности погрешности измерения при $\lambda_0 > \lambda_3$ грубо оцениваются по соотношению

$$\left| \frac{t_n - t_3}{t_0 - t_b} \right| < \frac{\alpha_0 h}{\lambda_3}, \quad (11.70)$$

в котором сохраняются прежние обозначения.

Следует с осторожностью относиться к покрытию места расположения спая металлической фольгой, бумагой и т. п. В некоторых случаях из-за разницы в коэффициентах излучения и поглощения покрытия и поверхности тела при наличии внешних источников теплового излучения роль покрытия может оказаться отрицательной.

Выход чувствительного элемента ИПТ на поверхность тела (рис. 11.14). Неискаженные влиянием ИПТ условия теплообмена тела со средой подчиняются соотношениям (11.65). Приближенная оценка методической статической погрешности измерения температуры поверхности тела для данного случая выполняется по уравнению

$$\Delta_t = t_s - t_n = \frac{1 - \frac{\lambda_o}{\lambda_s}}{1 + \frac{\lambda_o \beta}{\alpha_o}} (t_s - t_n) = \frac{1 - \frac{\lambda_o}{\lambda_s}}{\frac{\lambda_o}{\lambda_s} + \frac{\lambda_o \beta}{\alpha_o}} (t_n - t_a), \quad (11.71)$$

где

$$\beta = \sqrt{\frac{4K}{\lambda_s d}}, \quad K \approx \left(\frac{h_s}{\lambda_s} + \frac{d}{\lambda_o} \right)^{-1}, \quad (11.72)$$

t_s и t_n — измеренная и действительная температуры поверхности; d — диаметр ИПТ; h_s и λ_s — толщина и коэффициент теплопроводности зазора (замазки, воздуха, контактного слоя), отделяющего ИПТ от объекта (рис. 11.14). Влияние конструктивных и теплофизических факторов выявляется непосредственно при анализе соотношения (11.71).

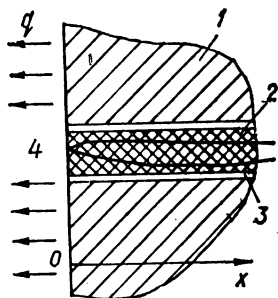


Рис. 11.14. Расположение ИПТ в толще тела с выходом чувствительного элемента на поверхность: 1 — исследуемое тело; 2 — ИПТ; 3 — зазор; 4 — среда.

Пусть ИПТ (термопара, спай которой выходит на поверхность) применяется для регистрации кратковременных (импульсных) тепловых процессов. Тогда взаимосвязь измеренной $t_s(\tau)$ и действительной $t_n(\tau)$ температур в предположении, что объект и термопара практически не взаимодействуют друг с другом ($\lambda_s = 0$) и «ведут себя» как полупространство, определяется выражением

$$t_s(\tau) = \frac{b_o}{b_s} t_n(\tau) = \sqrt{\frac{\lambda_o c_o \gamma_o}{\lambda_s c_s \gamma_s}} t_n(\tau), \quad (11.73)$$

где b_o и b_s — тепловые активности; λ , c и γ — соответствующие теплофизические характеристики тела и ИПТ. Входным тепловым воздействием при выводе формулы (11.73) являлся тепловой поток $q(\tau)$, одинаковый для термопары и тела.

Картина теплообмена усложняется, если тепловое воздействие происходит конвективно-лучистым путем от среды с температурой $t_a(\tau)$. В этом случае выполняется следующее соотношение:

$$\frac{T_s(s)}{T_o(s)} = \frac{b_o}{b_s} \frac{1 + \frac{\alpha_o}{b_o \sqrt{s}}}{1 + \frac{\alpha_o}{b_s \sqrt{s}}}, \quad (11.74)$$

где α_o — коэффициент теплоотдачи. При монотонном процессе нагрева с течением времени роль слагаемых $\alpha_o/b_o \sqrt{s}$ и $\alpha_o/b_s \sqrt{s}$ уменьшается

и из (11.74) получается выражение, однотипное с формулой (11.73). Соотношения (11.73) и (11.74) справедливы, если в начальный момент времени $t_3(0) = t_n(0) = 0$.

ИПТ расположен в глубине тела без выхода на поверхность. Возможны два характерных случая размещения, условно показанные на рис. 11.15. При расположении по схеме, показанной на рис. 11.15, а, ИПТ (обычно термopара) вытянут вдоль изотермической поверхности и располагается в канале, удаленном от поверхности на расстояние x_0 . Пусть он достаточно миниатюрен и находится в центре канала. Тогда приближенно с учетом ограничений, изложенных в в гл. 4, можно полагать, что в стационарном режиме теплообмена средняя температура его чувствительного элемента t_3 соответствует температуре $t(x_0)$ в занимаемой ИПТ области. В результат измерений необходимо внести поправку, учитывающую градиент температур по глубине. При одномерном потоке тепла через плоскую или цилиндрическую поверхность формулы для поправок получаются из общеизвестных уравнений стационарного распределения температур:

$$\Delta t = t_3 - t_n = -\frac{q}{\lambda_0} x_0,$$

$$\Delta t = t_3 - t_n = -\frac{q}{2\pi\lambda_0} \left| \ln \frac{r_3}{r_0} \right| = -\frac{q}{2\pi\lambda_0} \left| \ln \left(1 - \frac{x_0}{r_0} \right) \right|, \quad (11.75)$$

где t_n — действительная температура поверхности тела ($x = 0$); q — удельный тепловой поток в расчете на единицу площади плоской поверхности или единицу длины цилиндрической поверхности; λ_0 — коэффициент теплопроводности тела; r_0 и r_3 — соответственно внешний радиус цилиндрического тела и радиус расположения чувствительного элемента ИПТ ($r_0 - r_3 = x_0$).

В нестационарном режиме теплообмена пересчет показаний миниатюрного ИПТ, удаленного от поверхности на расстояние x_0 и искажающего поле температур в исследуемом теле (см. рис. 11.15, а), осуществляется согласно уравнению

$$\frac{T_3(s)}{T_n(s)} = \exp \left(-\frac{x_0}{\sqrt{a_0}} \sqrt{s} \right). \quad (11.76)$$

Здесь входным воздействием является тепловой поток $q(\tau)$, а $T_3(s)$ и $T_n(s)$ — изображения измеренной $t_3(\tau)$ и действительной $t_n(\tau)$ температур поверхности. После обратного преобразования имеем

$$t_3(\tau) = \frac{x_0}{2\sqrt{\pi a_0}} \int_0^\tau \frac{1}{\sqrt{(\tau - \eta)^3}} \exp \left[-\frac{x_0^2}{4a_0(\tau - \eta)} \right] t_0(\tau - \eta) d\eta, \quad (11.77)$$

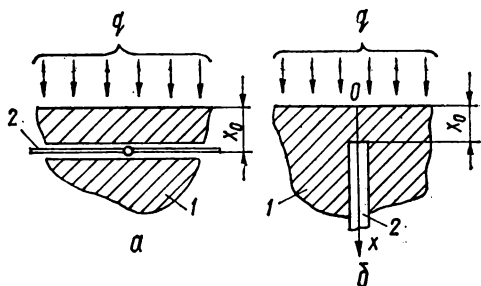


Рис. 11.15. Расположение ИПТ внутри тела: а — в канале; б — в толще тела; 1 — исследуемое тело; 2 — ИПТ.

где η — переменная интегрирования. В частных случаях предпочтительнее вместо (11.77) пользоваться выражением (11.76), подставляя в него $T_s(s)$ или $T_n(s)$, найденные по известным или предполагаемым зависимостям $t_s(\tau)$ или $t_n(\tau)$.

Амплитудно- и фазочастотные характеристики определяются по (11.76) или непосредственно из решений о прохождении температурных волн в полупространстве:

$$A(\Omega) = \frac{A(x_0)}{A(0)} = e^{-\Omega^2}, \quad \varphi(\Omega) = -\Omega, \quad (11.78)$$

где Ω — безразмерная частота колебаний;

$$\Omega = x_0 \sqrt{\frac{\omega}{2a_0}} = x_0 \sqrt{\frac{\pi}{a_0 T}}; \quad (11.79)$$

$A(0)$ и $A(x_0)$ — амплитуды колебаний действительной $t_n(\tau)$ и измеренной $t_s(\tau)$ температур тела; T и ω — период и частота колебаний.

Простое аналитическое решение для оценки погрешности измерения при расположении ИПТ по схеме, показанной на рис. 11.15, б, не найдено. Температурная погрешность и ее знак зависят от соотношения между теплофизическими свойствами ИПТ и объекта, диаметра ИПТ, глубины x_0 его залегания, а также от характера теплового воздействия на поверхность.

11.7. Пространственно-временное восстановление температуры по ограниченному числу результатов измерений

В практике температурных измерений известна группа задач, решение которых традиционными средствами измерений сопряжено со значительными трудностями, так как подлежащая контролю температура в выбранной точке объекта выходит за пределы допускаемого температурного интервала работы ИПТ. Такие экстраполяционные задачи актуальны в металлургии, газовой динамике, плазменной технике.

Несмотря на сравнительно большое количество патентов и авторских свидетельств, практический их выход остается достаточно скромным, что объясняется несколькими причинами: сложностью моделирования физической картины процессов, недостаточной проработкой методических основ и ограниченным опытом, накопленным в этой области. Значительная часть работ направлена на решение задачи определения стационарной температуры жидких или газовых сред.

Сущность применяемых методов, часто называемых динамическими, состоит в использовании начального участка переходного процесса (кривых разогрева) одного или нескольких ИПТ. Последующая обработка соответствующих кривых (ручная или автоматическая) позволяет рассчитать стационарную температуру среды, принимаемую за действительную. Выделяются методы, основанные на периодическом кратковременном погружении измерителя в исследуемую среду и анализе квазистационарной температуры при различных частотах погружения.

Оценка методических погрешностей восстановления температуры зависит от выбранных условий обработки кривых переходного процесса. Исследование некоторых модификаций динамических методов

показывает, что их точность на существующем уровне реализации оказывается недостаточной. Одна из причин состоит в том, что экстраполяционные формулы, полученные при использовании линейной теории теплопроводности, распространяются на температуры, значительно отличающиеся от регистрируемых значений. Температурная зависимость теплофизических свойств измерителя и среды, а также действие лучистого теплообмена приводят к систематической погрешности, достигающей 20 % и более для диапазона температур 3000...5000 К.

В последнее десятилетие интенсивно развиваются методы восстановления температурных полей в объектах по ограниченному числу точек измерений, основанные на закономерностях теплопередачи внутри исследуемого объекта. Помимо самостоятельного интереса — определения поля температур и их локальных значений в труднодоступных местах объекта, эти методы помогают в решении иных целевых задач, например определение условий теплообмена на границе объекта и среды, т.е. нахождение температуры и теплового потока на границе, определение коэффициента теплоотдачи или температуры среды, окружающей объект. Самостоятельные направления представляют задачи нахождения теплофизических или других температурозависимых характеристик объекта.

Общей теоретической основой методов восстановления температурных полей и связанных с ними исследований тепловых процессов являются аналитические или машинные (численные) решения обратных задач нестационарной теплопроводности. В зависимости от конкретной направленности и строгости постановки, определяемых прикладными целями исследований, приемы и алгоритмы решения обратных задач широко варьируются. Методические погрешности восстанавливаемых температур и базирующихся на их основе других теплообменных и теплофизических характеристик преимущественно оцениваются, исходя из частных особенностей решаемой задачи.

12.1. Общие сведения о характере излучения пламен

Пламя представляет собой газовый поток, внутри которого происходит химическая реакция горения взвешенных в потоке частиц жидкого или твердого топлива с бурным выделением тепла. Скорость выделения тепла и интенсивность излучения определяют температуру факела.

В спокойных ламинарных пламенах типа бунзеновского можно выделить три зоны: внутренний конус, в котором происходит химическая реакция; внешний конус, содержащий продукты горения; находящаяся между этими двумя конусами промежуточная переходная зона. В турбулентных пламенах химическая реакция горения происходит в микрообъемах, в той или иной степени распределенных равномерно по всему сечению факела.

Наличие процессов горения в пламени обуславливает специфические особенности его излучения. Наряду с чисто термическим излучением нагретых газов, характеризующим равномерным распределением энергии по всем степеням свободы излучающих молекул и атомов газов, в зонах реакции возникает дополнительное излучение, называемое «хемилюминесценцией». В этом случае химическая энергия горения непосредственно превращается в излучение, свойства которого существенно отличаются от свойств термического излучения.

В реагирующих газах не может происходить равновесное распределение энергии, даже если рассматривать возможность образования новых типов молекул в результате химической реакции. Если молекула вследствие химической реакции перешла в возбужденное состояние, то весьма существенное значение имеют ее последующие превращения. Среднее время, необходимое молекуле для излучения света и перехода в основное состояние (время жизни), для разрешенных электронных переходов составляет $10^{-8} \dots 10^{-9}$ с. В газах обычных пламен, горящих при атмосферном давлении, молекулы испытывают около 10^9 соударений за 1 с, если предполагать, что их поперечные сечения имеют нормальную величину. Но молекулы, находящиеся в возбужденном состоянии, должны иметь большие поперечные сечения. Таким образом, можно принять, что возбужденная молекула в газе под атмосферным давлением испытывает от 10 до 1000 столкновений, что явно недостаточно для достижения равномерного распределения энергии по степеням свободы. Поскольку в ряде случаев давление составляет 0,1 или даже 0,01 атмосферного, невозможность выравнивания распределения энергии в течение времени жизни возбужденной молекулы в этих условиях становится еще более очевидной. Восстановлению равновесного распределения энергии препятствуют также огромные градиенты температур в пламенах, достигающие сотен тысяч кельвинов на миллиметр. Такие градиенты температур, естественно,

означают сильную пространственную анизотропию скоростей молекул и нарушение статистических законов обмена количества движения.

Так как температура группы молекул и атомов характеризуется распределением вероятностей энергетических состояний, то при неравномерном распределении энергии по степеням свободы каждому виду движения молекул будет соответствовать своя температура. Поэтому в зависимости от выбранного физического закона, используемого для измерения температуры неравновесного пламени, получают «поступательные», «колебательные» или «вращательные» температуры. Эти названия условных температур указывают на вид энергии движения, использованный для измерения температуры.

Пламена, в состав горючего которых входят углеводороды, при недостаточно полном сгорании содержат во взвешенном состоянии частицы углерода (сажи). Если газы, образующие факел, излучают селективно и энергия их излучения сосредоточена в более или менее узких спектральных областях, то находящиеся в пламени частицы сажи излучают как твердые тела и обладают сплошным спектром излучения с довольно высоким коэффициентом черноты. Следовательно, наличие в пламени взвешенных частиц сажи вызывает появление сплошного спектра и приводит к возникновению общего свечения пламени.

Чем больше концентрация частиц сажи в пламени, тем больше интенсивность его свечения и тем выше, следовательно, коэффициент черноты излучения пламени. Поэтому при сжигании природного газа в высокотемпературных печах практикуют режим самокарбюрации пламени или карбюрации его мазутом. В зависимости от величины общего свечения пламени различают светящиеся и несветящиеся пламена. Принято считать пламя светящимся, если коэффициент черноты его излучения в видимой области спектра превышает 0,15.

Частицы сажи ввиду малого их размера обладают очень высоким коэффициентом конвективной теплоотдачи. По этой же причине снижение температуры частиц сажи, вызванное потерями энергии при лучистом теплообмене с окружающими пламя холодными телами, невелико. В нестационарных пламенах термическая инерция частиц сажи вызывает отставание их температуры от температуры факела. В стационарных пламенах температура частиц сажи близка к температуре окружающего их газа.

Неравновесность излучения в зоне реакции не влияет на чисто термический характер излучения частиц сажи, состоящих из огромного количества атомов. Излучение самих частиц сажи (или других твердых частиц, взвешенных в пламени) нельзя рассматривать как излучение черного тела. Коэффициент черноты собственного излучения твердых частиц (и даже сажи) значительно меньше 1 и, как для каждого твердого тела, обладает некоторой селективностью. Излучение всего факела светящегося пламени складывается из следующих составляющих: 1) собственного излучения атомов и молекул в дискретных областях спектра; 2) сплошного спектра собственного излучения взвешенных твердых частиц; 3) рассеянного молекулами, атомами и твердыми частицами излучения всех частей факела.

Последняя составляющая создает селективность излучения факела. Если рассеяние излучения атомов и молекул сосредоточивается в тех же дискретных областях спектра, в которых оно испускалось, то рассеяние излучения твердых частиц охватывает весь сплошной спектр и накладывается на сплошной спектр собственного излучения частиц. Однако, согласно теории рассеяния света крупными частицами, интенсивность рассеянного излучения изменяется по спектру прибли-

зительно пропорционально λ^{-n} . Для размеров и характера частиц пламен $1 < n < 1,4$. Следовательно, интенсивность рассеянного света монотонно уменьшается по мере возрастания длины волны λ . В результате наложения спектра рассеяния на сплошной спектр излучения твердых частиц излучение пламени приобретает селективный характер.

12.2. Особенности применения контактных методов для измерения температур пламен

Высокие температуры и агрессивность газов в пламени создают существенные ограничения применимости контактных методов. Возможность применения того или иного контактного метода для измерения температуры данного пламени часто определяется подбором соответствующих жаростойких материалов со стабильными характеристиками как для самого термоприемника, так и для арматуры. Далее, введение в зону реакции любого термоприемника неизбежно вызывает локальное нарушение поля скоростей факела. За тыльной поверхностью термоприемника часто наблюдаются явления дожигания, приводящие к искажению температурного поля факела. Кроме того, отток тепла от термоприемника по соединительным проводам и снижение его температуры в результате лучистого теплообмена (через пламя) с окружающими пламя предметами при высоких измеряемых температурах могут весьма существенно снизить показания термоприемника. Особенно велики радиационные потери в несветящемся пламени. Рассчитать эти потери затруднительно.

При выборе материалов термоприемника для измерения температуры в зоне реакции следует учитывать и возможность возникновения каталитического эффекта, приводящего часто к значительному (до нескольких сотен кельвинов) превышению температуры термоприемника над температурой окружающих его газов. Поэтому целесообразно воздерживаться от применения термоприемников, по своей конструкции допускающих непосредственный контакт с пламенем сплавов, содержащих металлы платиновой группы (платина, палладий).

Контактные методы измерения температур пламен имеют и бесспорные преимущества. С помощью контактного термоприемника достаточно малого размера можно провести локальные измерения температуры и, следовательно, исследовать температурное поле факела (осуществить эти измерения оптическими методами часто затруднительно, а иногда и невозможно). Если вследствие указанных выше причин контактные термоприемники дают ошибочные абсолютные значения температур пламени, то разностные измерения, необходимые для исследования температурного поля факела, получаются достаточно надежными.

12.3. Метод обращения спектральных линий

Для измерения температур несветящихся или слабосветящихся пламен широко применяется метод обращения спектральных линий. Он основан на том, что интенсивность резонансной спектральной линии, испускаемой возбужденными атомами вещества, которое содержится в пламени, при прочих равных условиях зависит от температуры пламени. Часто используются спектральные линии щелочных металлов (натрия, лития, калия), имеющих низкий порог ионизации. Наиболее удобны желтые линии натрия, отсутствующего (в составе хлористого натрия) в примесях к горючему.

Принципиальная оптическая схема устройства, используемого для измерения температур пламени методом обращения спектральных линий, представлена на рис. 12.1. Излучение от источника S регулируется интенсивности с помощью линзы L_1 фокусируется внутри объема, заполняемого пламенем в данном его сечении. Прошедшее через газ излучение вместе с собственным излучением пламени фокусируется линзой L_2 на щели спектрального разрешающего прибора, соединенного с соответствующим регистрирующим устройством или заменяющим его окуляром для визуального наблюдения спектра. Наблюдатель на выходе спектрального прибора видит сплошной спектр, обусловленный источником излучения, и накладываются на него изображения спектральной линии. Изменяя яркость источника (силу тока через температурную лампу), добиваются, чтобы видимые яркости спектральной линии и сплошного спектра (фона) уравнивались и линия совпала с фоном — чтобы произошло обращение спектральной линии.

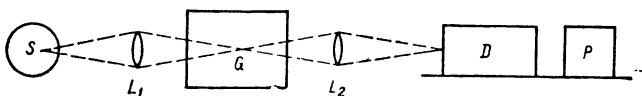


Рис. 12.1. Схема экспериментальной установки для измерения температуры пламени методом обращения спектральных линий:

S — источник света; G — раскаленный газ; L_1 и L_2 — линзы; D — спектральная разрешающая система; P — регистрирующее устройство.

Обозначим через b_{λ, T_1}^H — яркость источника, $b_{\lambda, T}^{пл}$ — яркость пламени и α — коэффициент поглощения пламени в узкой области длин волн, охватывающей спектральную линию. Полагая, что и спектральная линия, и соседний с ней фон претерпевают одинаковое ослабление в оптических деталях спектрального прибора, получаем для яркости спектральной линии, наблюдаемой в спектроскопе, выражение

$$b^H = b_{\lambda, T_1}^H (1 - \alpha) + b_{\lambda, T}^{пл}.$$

Так как градиент яркости по сплошному спектру источника невелик, то можно считать, что яркость сплошного спектра вблизи линии равна его яркости при длине волны спектральной линии. Тогда для условия равенства этих яркостей запишем

$$b_{\lambda, T_1}^H = b_{\lambda, T_1}^H (1 - \alpha) + b_{\lambda, T}^{пл}, \quad (12.1)$$

или

$$\alpha b_{\lambda, T_1}^H = b_{\lambda, T}^{пл}. \quad (12.2)$$

Но излучение спектральной линии носит чисто термический характер. Поэтому на основании закона Кирхгофа $\alpha = \varepsilon = b_{\lambda, T}^{пл} / b_{\lambda, T}^0$, где $b_{\lambda, T}^0$ — спектральная яркость абсолютно черного тела при той же длине волны и той же температуре. Тогда вместо (12.2) имеем

$$b_{\lambda, T_1}^H = b_{\lambda, T}^0, \quad (12.3)$$

где T_1 — яркостная температура источника. Таким образом, для условия обращения спектральной линии действительная температура пла-

мени равна яркостной температуре источника S . В окончательном выражении (12.3) не фигурирует коэффициент поглощения пламени α , различный для разных участков спектральной полосы, следовательно, это выражение справедливо для всей полосы. При однородном температурном поле факела и поле яркостей источника наблюдается одновременное исчезновение всего контура линии. Независимость характера исчезновения спектральной линии от коэффициента поглощения позволяет заключить, что метод обращения применим для измерения температур пламен, содержащих произвольное количество возбужденных атомов вещества, спектральные линии которого используются для измерения. Однако при очень малой концентрации пламени возбужденных атомов интенсивность спектральной линии становится настолько малой, а погрешности визуального или фотоэлектрического уравнивания яркостей линии и фона настолько большими, что они могут привести к большим погрешностям определения температуры пламени.

В большинстве случаев пламена имеют неоднородное распределение температуры по сечению факела. Наружные зоны факела вследствие интенсивной теплоотдачи оказываются более холодными. Применяя метод обращения в этих условиях, получаем некоторую среднюю «оптическую» температуру в данном сечении факела. При наличии градиента температур по сечению пламени в более холодных областях происходит поглощение излучения данной спектральной линии, испускаемой в горячей зоне, и наблюдается явление, названное самообращением линии. В результате получаем температуры, заниженные относительно измеряемых.

При измерении температур слабо светящихся пламен методом обращения неоднородность температурного поля пламени приводит к возникновению погрешности, обусловленной влиянием взвешенных твердых частиц. В однородном температурном поле, согласно закону Кирхгофа, независимо от коэффициента черноты излучения твердых частиц количество лучистой энергии, поглощаемое каждой частицей, равно количеству излученной энергии, и яркость источника, визируемого через факел, не изменится. Вследствие имеющихся в пламени зон с пониженной температурой излучение пламени, идущее из горячих зон, доходит до наблюдателя несколько ослабленным, и, значит, условия (12.1), справедливые для всего факела, оказываются нарушенными.

Наличие в пламени взвешенных твердых частиц приводит к ослаблению яркости источника также вследствие рассеяния света частицами. Следовательно, наличие в пламени значительного количества взвешенных твердых частиц занижает результаты измерения температур методом обращения спектральных линий. Этот метод используется не только для измерения средней температуры факела в данном его сечении, но иногда и для исследования поля температур. Выбираются спектральные линии такого щелочного металла, который либо совсем отсутствует, либо находится в очень небольшом количестве в горючем. Раствор солей щелочного металла последовательно вводят в отдельные места факела, осуществляя тем самым местное «окрашивание» пламени и наблюдая каждый раз обращение выбранных спектральных линий. Очевидно, что введение «красителя» в отдельные зоны факела в той или иной степени нарушает его температурное поле.

Интенсивность спектральных линий щелочных металлов определяется энергией поступательного движения атомов. Поэтому результаты измерения температур пламени в неравновесном состоянии методом обращения могут отличаться от результатов измерений, полученных оптическими методами, использующими энергию колебательного или вращательного движения атомов и молекул. Для проверки воз-

возможного влияния хемилюминесцентного излучения целесообразно измерение температур пламени методом обращения производить по нескольким спектральным линиям одного и того же металла или по спектральным линиям разных металлов. Близкие результаты измерений будут указывать на незначительное влияние хемилюминесцентного излучения, интенсивность которого сильно изменяется вдоль спектра. Для измерения как стационарных, так и нестационарных температур пламен методом обращения спектральных линий специально создано несколько типов аппаратуры. Большинство современной аппаратуры снабжено автоматическими устройствами для быстрого уравнивания яркостей спектральной линии и источника. Это быстродействие иногда таково, что весь измерительный процесс совершается в доли секунды, что позволяет измерять быстро изменяющиеся температуры.

Точность измерения температур методом обращения определяется как характером данного пламени, так и инструментальными погрешностями применяемой измерительной аппаратуры, ее динамическими характеристиками. Погрешность измерений температур стационарных несветящихся пламен методом обращения в наилучших условиях порядка ± 10 К без учета погрешности градуировки использованного источника излучения. Применение автоматических измерительных устройств несколько повышает эту погрешность (1...3 %).

12.4. Метод лучеиспускания и поглощения

Этот метод применяется для измерения температур светящихся пламен с такой концентрацией взвешенных в пламени твердых частиц, при которой коэффициент черноты излучения всего пламени не менее

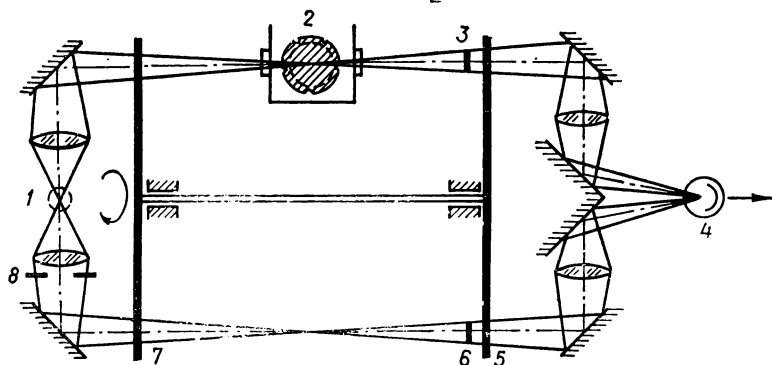


Рис. 12.2. Установка для измерения температуры пламени по методу лучеиспускания и поглощения:

1 — источник; 2 — пламя; 3, 6 — светофильтры; 4 — фотоэлемент; 5, 7 — диски с секторными вырезами; 8 — диафрагма.

0,2. Принципиальная схема установки для измерения температуры пламени по этому методу представлена на рис. 12.2. Излучение источника (температурной лампы) разделяется на два канала. В одном канале луч от источника пронизывает пламя, а во втором — обходит пламя. В обоих каналах излучение модулируется с помощью дисков 5 и 7 с секторными вырезами. При этом частота модуляции диском 7

в несколько раз больше, чем диском 5. Лучи после одинаковых светофильтров 3 и 6 опять сходятся на катоде фотоэлемента. Диафрагма служит для изменения сигнала источника с яркостной температурой $T_{ис}$. Таким образом, в каждом цикле измерений фотоэлемент фиксирует поочередно три интенсивности: $b_{ис}$ — излучения источника, $b_{пл}$ — излучения пламени и $b_{ис}^{пл}$ — излучения источника, прошедшего через пламя. Используя спектральный закон Вина, можно записать:

$$\frac{b_{ис} - b_{ис}^{пл}}{b_{пл}} = e^{\frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_{пл}} - \frac{1}{T_{ис}} \right)}. \quad (12.4)$$

При использовании фотоэлектрической измерительной системы с линейной характеристикой левая часть равенства (12.4) определяется непосредственно как разность отношений ординат записей соответствующих сигналов. Поэтому, зная яркостную температуру источника и эффективную длину волны пропускания светофильтров с данным фотоэлементом, с помощью формулы (12.4) легко определить температуру пламени. В отличие от метода обращения спектральных линий здесь в процессе измерений нет необходимости изменять температуру источника. Яркостная температура источника может быть даже ниже измеряемой температуры пламени, что практически очень важно из-за трудностей создания стабильных высокотемпературных источников. Однако, чем больше разность $T_{ис} - T_{пл}$, тем больше погрешность измерения $T_{пл}$.

Измерение стационарных температур пламени методом лучеиспускания и поглощения может быть осуществлено более простыми измерительными средствами, например обычным оптическим пирометром с исчезающей нитью. В этом случае пирометром поочередно измеряются три яркостные температуры: источника (температурной лампы); пламени; источника, визируемого через пламя. Температура пламени рассчитывается по формуле (12.4), в левую часть которой подставляются яркости черного тела, соответствующие трем измеренным яркостным температурам. Точность измерения стационарных температур пламен методом лучеиспускания и поглощения, кроме инструментальных погрешностей применяемой аппаратуры, определяется также степенью однородности температурного поля по сечению факела. Измерение температур в зоне реакции может сопровождаться теми же методическими погрешностями, что и в случае метода обращения.

12.5. Метод абсолютной интенсивности спектральной линии

Этот метод основывается на зависимости интенсивности насыщенного центра резонансной спектральной линии от температуры пламени. Используются спектральные линии какого-либо щелочного металла с достаточно низким потенциалом ионизации. При малой концентрации щелочного металла в горючем интенсивность резонансной линии зависит не только от температуры пламени, но и от степени концентрации. Контур линии для этого случая представлен на рис. 12.3. По мере увеличения концентрации интенсивность линии растет, увеличивается ордината центра линии и расширяются ее крылья. Рост ординаты центра линии происходит до тех пор, пока не наступит своего рода «насыщения» (кривые 2 и 3), при котором дальнейшее уве-

личение концентрации щелочного металла не вызывает больше возрастания центральной части линии.

Это свойство эмиссионных линий спектра приводит к тому, что при достаточной концентрации излучающего элемента интенсивность насыщенного центра спектральной линии становится однозначной функцией только температуры пламени с монохроматическим коэффициентом черноты излучения, равным 1. Следовательно, насыщенная часть линии излучает как абсолютно черное тело, и, измерив интенсивность центра насыщенной линии, можно определить действительную температуру пламени по законам излучения абсолютно черного тела.

При использовании резонансной линии натрия с длиной волны 0,5893 мкм необходимая для получения насыщенного излучения концентрация атомов натрия в пламени равна $10^{13} \dots 10^{14}$ атомов в 1 см^3 при температурах порядка 2000 К. В этом случае спектральная ширина насыщенной области излучения вблизи центра линии составляет 0,1...0,2 Å. Если горючее не обладает достаточной концентрацией выбранного излучающего элемента, то он может быть введен в соответствующем растворе в горючее. Требуемые концентрации излучающего элемента настолько малы, что не могут ощутимо исказить кинетику горения.

Небольшая спектральная ширина насыщенной области линии обуславливает применение спектральной аппаратуры с большой разрешающей способностью, например спектрографов с дифракционной решеткой. Весьма перспективным представляется применение «эталонов» Фабри — Перо. Подбрав соответствующим образом параметры «эталонов», можно получить от данной спектральной линии достаточно большое центральное пятно интерференционной картины. Круглая диафрагма позволяет вырезать из этого пятна центральную область, соответствующую насыщенному излучению центра линии. Интенсивность выделенного таким образом насыщенного излучения линии измеряется с помощью какого-либо фотоэлектрического фотометра.

Метод абсолютной интенсивности спектральных линий практически не имеет верхнего предела измеряемых температур. Со стороны очень высоких температур применимость метода ограничивается областью, в которой происходит ионизация основной массы атомов излучающего металла. Для спектральных линий натрия такой границей будут, по-видимому, температуры 7000...8000 К. Использование излучающего элемента с более высоким потенциалом ионизации позволяет еще больше отодвинуть эту границу.

Метод абсолютной интенсивности применим для измерения температур как несветящихся, так и светящихся пламен. Его инструментальная погрешность — около 1 % измеряемой температуры (для спектральной аппаратуры с дифракционной решеткой). При исследовании этим методом пламен с неоднородным температурным полем, так же как и в случае метода обращения, возникают дополнительные погрешности, связанные с самообращением спектральных линий.

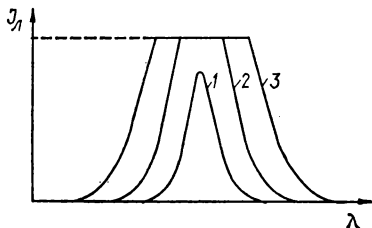


Рис. 12.3. Зависимость интенсивности резонансной линии от концентрации щелочных металлов в горючем:

1 — при малой концентрации щелочного металла; 2, 3 — при концентрации, достаточной для снижения «насыщения».

12.6. Метод относительных интенсивностей спектральных линий

Этот метод (метод Орнштейна) позволяет определить температуры пламени по результатам измерения отношения интегральных интенсивностей двух спектральных линий, принадлежащих одному и тому же излучающему элементу. Согласно квантовой теории излучения, отношение интенсивностей E_1 и E_2 двух спектральных линий, соответствующих длинам волн λ_1 и λ_2 , определяется выражением

$$r = \frac{E_1}{E_2} = \frac{A_1 g_1}{A_2 g_2} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^e - \frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{kT}, \quad (12.5)$$

где A_1 , A_2 , g_1 и g_2 — вероятности переходов и статистические веса исходных уровней; \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 — соответствующие этим линиям энергии возбуждения; k — постоянная Больцмана.

В отличие от метода абсолютной интенсивности, применимого в условиях достаточной для насыщения линии концентрации излучающих атомов, метод относительных интенсивностей может быть использован только в условиях малых концентраций. Причина такого ограничения заключается в том, что абсолютные интенсивности разных спектральных линий различны, и, следовательно, степень приближения их к состоянию насыщения будет разной. Поэтому отношение интенсивностей r , определяемое формулой (12.5), не является однозначной мерой только температуры пламени, а определяется также степенью, в какой одна и другая спектральные линии далеки от состояния насыщения, т. е. от той области, в которой нарушается прямая пропорциональность интенсивности линии и концентрации излучающего элемента. Логарифмируя (12.5), получаем

$$\frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{k} \frac{1}{T} = - \ln \frac{E_1 \lambda_2}{E_2 \lambda_1} + \ln \frac{A_1 g_1}{A_2 g_2}. \quad (12.6)$$

Таким образом, обратная температура пламени линейно связана с логарифмом отношения интенсивности двух линий.

Для проверки отсутствия влияния области насыщения или химилуминесценции целесообразно использовать несколько спектральных линий одного и того же элемента, находя попарно отношения их интенсивностей и определяя для каждой пары температуру пламени с помощью формулы (12.6). Сходимость результатов измеренных температур по разным парам линий служит хорошим контролем применимости метода в данных условиях.

Относительная погрешность определения температуры, обусловленная погрешностью измерения отношения r , прямо пропорциональна температуре T и обратно пропорциональна разности энергий верхних состояний двух линий: $\Delta T/T = kT \Delta r/r (\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2)$. Если в качестве примера взять обычную разность энергий во вращательных спектрах ($\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = 4000 \text{ см}^{-1}$) и положить $\Delta r/r = 5\%$, то для пламени в 2000 К ($k = 0,695 \text{ см}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$) получим $\Delta T/T = 0,017$ и $\Delta T = 35 \text{ К}$.

Для осуществления метода относительных интенсивностей создана специальная аппаратура, которая в сочетании с электронной решающей схемой находит логарифм отношения интенсивностей выбранных спектральных линий и решает уравнение (12.6) непосредственно относительно T .

Наиболее благоприятно применение метода относительных интенсивностей для исследования пламен с температурами выше 3000 К.

В этих условиях значительно расширяются границы области линейной зависимости интенсивности линий от концентрации излучающего элемента; кроме того, сильно увеличивается количество линий в спектре пламени, что облегчает их выбор.

12.7. Определение температуры по доплеровскому уширению спектральных линий

Хаотическое движение излучающих атомов раскаленных газов пламени, вследствие эффекта Доплера, вызывает возникновение контура линии по форме гауссовой кривой с тем большим уширением по спектру, чем больше кинетическая энергия поступательного движения атомов или чем выше температура пламени. Если уширение спектральной линии обусловлено только эффектом Доплера, то полуширина спектральной линии связана с температурой газа T выражением

$$b = 2 \sqrt{2 \ln 2} \sqrt{\frac{RT}{\mu c^2}} \nu = 0,71 \cdot 10^{-7} \nu \sqrt{\frac{T}{\mu}}, \quad (12.7)$$

где μ — молекулярная масса газа; ν — волновое число, соответствующее данной спектральной линии. Так как T , определяемая этим способом, характеризует среднюю кинетическую энергию поступательного движения атомов, ее называют поступательной температурой.

Практическая реализация этого метода измерения температур пламени сопровождается часто значительными трудностями, обусловленными тем, что наблюдаемый контур спектральной линии вызван не только доплеровским уширением, но и так называемым лоренцовским уширением. Последнее появляется вследствие столкновения молекул газа между собой и зависит от плотности газа и эффективных сечений молекул. При нормальном атмосферном давлении и не слишком высоких температурах лоренцовское уширение оказывается значительно больше доплеровского. Только при давлениях 0,01 атм и ниже можно наблюдать достаточно чистый доплеровский контур.

По форме контура спектральной линии находят отношение лоренцовского и доплеровского уширений. Зная это отношение и измеряемую полуширину спектральной линии, определяют полуширину линии, обусловленную чисто доплеровским уширением, а по формуле (12.7) — температуру газа. Наиболее удобная аппаратура для осуществления этого метода основана на применении «эталоны» Фабри — Перо.

12.8. Определение «вращательной» температуры

Температуры пламен, имеющих в спектре полосы излучения, можно измерить по энергии вращательного движения молекул. Этот метод аналогичен методу относительных интенсивностей. Для его осуществления выбираются две или несколько линий тонкой вращательной структуры полос. Интенсивность каждой такой линии характеризуется выражением

$$E = N A \nu^4 e^{-\frac{\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2}{kT}}, \quad (12.8)$$

где N — число возбужденных молекул; \mathcal{E}_1 и \mathcal{E}_2 — вращательные энергии начального и конечного состояний. Находя отношение интенсив-

ностей каждой из выбранных линий к одной из них, строят полулогарифмический график, в котором по оси абсцисс откладывают $(\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2)/k$ для разных линий. Тогда $1/T$ определится как тангенс угла наклона получающейся прямой.

Для пламен, содержащих молекулы гидроксила OH , используется спектр излучения этих молекул, соответствующий переходу от возбужденного к невозбужденному состоянию. Наиболее удобны интенсивные полосы при длинах волн 0,3064, 0,3122 и 0,3185 мкм, расположенные в ультрафиолетовой области спектра. Для их хорошего разрешения требуется спектральная аппаратура с кварцевой оптикой, обладающая большой дисперсией. Регистрация осуществляется методами фотографической фотометрии. При выборе линий тонкой структуры очень важно, чтобы в их число не попали линии, накладываются друг на друга. Использование нескольких (а не двух) линий обусловлено необходимостью проконтролировать отсутствие влияния самопоглощения линий или хемилюминесценции, весьма интенсивной в этой области. При наличии такого влияния точки для разных линий не будут укладываться на прямую графика.

Для исключения влияния самопоглощения используется так называемый метод равных интенсивностей: выбираются пары линий тонкой структуры, обладающие равной интенсивностью. Линии должны располагаться по обе стороны от максимума данной полосы. На эти линии самопоглощение должно влиять одинаково, и, следовательно, в отношении интенсивностей оно будет исключено.

12.9. Определение «колебательной» температуры

Полосатые спектры излучения молекул позволяют определить температуру пламени, соответствующую энергии колебательного (вibrационного) движения атомов в молекуле. Для этой цели найдется либо отклонение интенсивностей вблизи максимумов двух полос, либо отношение их полных интенсивностей. Так как интенсивность полос колебательной структуры описывается уравнением, аналогичным (12.8), то «колебательная» температура определяется как котангенс угла наклона прямой, построенной в полулогарифмическом масштабе по измеренному отношению интенсивностей каждой пары полос.

Измерение интенсивностей полос не требует спектральной аппаратуры большой разрешающей способности, что существенно упрощает технику эксперимента. Однако при недостаточно тщательном выборе спектральных областей результат измерений может оказаться искаженным наложением линий тонкой структуры. Наилучшие результаты измерений «колебательных» температур получаются при использовании полос излучения двухатомных молекул, например OH .

12.10. Метод яркостной температуры

Для светящихся пламен с высоким коэффициентом черноты излучения применяется простой в аппаратурной реализации метод измерения яркостной температуры пламени. Во многих случаях используется обычный оптический пирометр с исчезающей нитью. Отождествление измеренной яркостной температуры пламени с его действительной температурой возможно только для пламени с настолько большой концентрацией взвешенных частиц, что коэффициент черноты его излучения практически равен 1. Поэтому измерение яркостной

температуры пламени целесообразно сопровождать измерением монохроматического коэффициента черноты излучения ϵ_λ для той длины волны, которая соответствует эффективной длине волны используемого оптического пирометра.

Наибольшая простота и достаточная надежность достигается при использовании сферического вогнутого зеркала, устанавливаемого позади пламени (рис. 12.4) так, чтобы центр его кривизны находился внутри пламени, на его оси. Этим же оптическим пирометром измеряются собственная яркость факела a и суммарная яркость b , обусловленная яркостью пламени и яркостью его изображения, которое образуется в фокусе зеркала и видно через пламя. Если обозначить через ρ_λ — коэффициент отражения сферического зеркала для данной длины волны, а через α_λ — средний коэффициент поглощения пламени, то для обоих

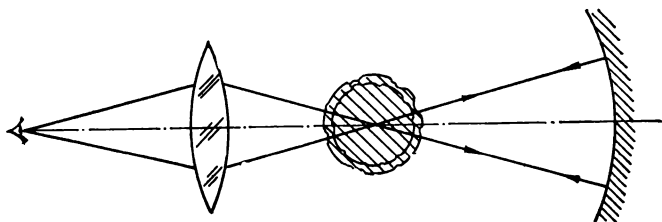


Рис. 12.4. Схема расположения сферического зеркала при измерении яркостной температуры.

результатов измерений имеем $a = E_{\text{пл}}$, $b = E_{\text{пл}} + \rho_\lambda E_{\text{пл}} (1 - \alpha_\lambda)$, откуда $\alpha_\lambda = 1 - (b - a)/(\rho_\lambda a)$. Для пламени с термическим характером излучения, очевидно, $\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda$. Определение действительной температуры пламени по его яркостной температуре и коэффициенту черноты излучения производится обычным способом. Для измерения яркостных температур нестационарных пламен требуется быстродействующая фотоэлектрическая аппаратура.

12.11. Метод цветовой температуры

К пламенам со сплошным спектром применим обычный метод определения цветовой температуры по отношению измеренных интенсивностей спектра для двух длин волн. Если монохроматические коэффициенты черноты излучения для этих длин волн равны, то цветовая температура пламени равна его действительной температуре. Однако для сильно светящихся пламен такое равенство не всегда выполняется. Излучение массы взвешенных в газе частиц сопровождается рассеянием на них лучистой энергии. В результате монохроматический коэффициент поглощения светящихся пламен α_λ , а при термическом характере излучения и его монохроматический коэффициент черноты излучения ϵ_λ убывают с длиной волны спектра: $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda = \epsilon_0/\lambda^n$. Показатель степени для различных типов пламен приведен в табл. 12.1. Так как ϵ_λ зависит от длины волны, то измеренная цветовая температура светящегося пламени в ряде случаев несколько выше действительной.

Влияние рассеяния излучения взвешенными частицами на вид зависимости $\epsilon(\lambda)$ ограничивает применение цветового метода измере-

Таблица 12.1. Показатель степени для различных типов пламен

Тип	n	Тип	n
Ацетон	1,43	Нитроцеллюлоза	1,14
Амилацетат	1,39	Бензол—окись азота	1,05
Коксовый газ—воздух	1,29	Ацетилен—воздух	0,66...0,75
Бензол—воздух	1,23		

ния температуры пламени. Целесообразно перед измерением этим методом температуры мало изученных пламен поставить контрольный эксперимент, позволяющий оценить, существенна ли в данном пламени интенсивность рассеянного света. Наиболее удобный объект для постановки эксперимента — факел, выходящий из сопла камеры сгорания. Если визировать факел перпендикулярно его оси через вращающийся поляризатор, то при наличии в данном сечении факела рассеяния света, выходящего из камеры сгорания, фотоэлемент, установленный за поляризатором, будет фиксировать гармоническую составляющую. Отсутствие такой гармонической составляющей даст некоторую уверенность в правомерности применения к данному пламени метода цветовой пирометрии.

При наличии явно выраженной зависимости $\epsilon(\lambda)$, по-видимому, перспективным является определение температуры пламени по отношениям не двух, а попарно взятых вблизи длин волн λ_1, λ_2 , и λ_n трех интенсивностей сплошного спектра. Тогда соответствующим образом составленные уравнения позволяют исключить показатель степени и привести изучение пламени к излучению серого тела. Измеренная в этом случае цветовая температура равна действительной.

Инструментальная погрешность выпускаемых серийных цветковых пирометров, предназначенных для измерения стационарных или медленно изменяющихся температур, составляет 1 %, что следует признать удовлетворительным.

Некоторые затруднения возникают при измерении цветковых температур нестационарных пламен. Использование двухканальных измерительных систем с двумя независимо действующими приемниками, обеспечивающими одновременную регистрацию двух световых импульсов, приводит к весьма ощутимому влиянию неустойчивости каждого канала усиления. Применение одноканальных схем требует поочередной регистрации импульсов, что ограничивает возможность измерения температур при кратковременных процессах. В последнем случае представляется целесообразным применение методов фотографической фотометрии за счет некоторой потери точности.

12.12. Выбор метода измерения температур пламени

Кроме изложенных выше, разработаны и другие методы измерения температур пламен: измерения температур по скорости распространения ультразвука; измерения, основанные на использовании зависимости от температуры степени ионизации газовой среды или изменения ее показателя преломления. Однако проблему измерения темпе-

ратуры пламен нельзя считать решенной удовлетворительно. Не существует еще достаточно универсального и надежно работающего в различных условиях прибора, что обуславливается не только сложностью проблемы, но и большим разнообразием объектов и условий измерения.

Поэтому в ряде случаев получение достаточно надежных результатов измерений температуры пламени может быть достигнуто только постановкой специального исследования с привлечением арсенала средств различных областей измерительной техники. Выбор метода (одного или нескольких) для измерения температуры должен быть произведен с учетом прежде всего особенностей спектра излучения пламени, условий измерений и временных характеристик процесса горения. При этом необходимо учитывать, что сложность структуры объекта измерений может, при использовании того или иного метода, привести к возникновению весьма существенных методических погрешностей. Представляется целесообразным в ответственных случаях не ограничиваться применением одного метода измерения, а использовать по крайней мере два принципиально различных метода, основанных на различных физических свойствах пламени. Тогда степень сходимости результатов измерений, полученных при независимом использовании методов, может служить критерием их надежности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

РУБРИКАТОР

- 1.0 Метрологическое обеспечение измерений
- 1.1 Температурные шкалы: воспроизведение, единицы измерений, реперные точки, эталоны, источники излучения
- 1.2 Образцовые приборы и вещества
- 1.3 Методы и средства определения номинальных статических характеристик и поверки приборов
- 1.4 Погрешности измерений
- 2.0 Общие вопросы
- 2.1 История термометрии. Теория температурных измерений
- 2.2 Обзоры приборов. Справочники
- 3.0 Методы и средства измерения температуры по условиям измерения
- 3.1 Динамические измерения температуры
- 3.2 Определения динамических характеристик измерительных преобразователей температуры
- 3.3 Измерение температуры поверхностей
- 3.4 Измерение температуры движущихся тел
- 3.5 Измерение температуры в газовых потоках и пламенах
- 3.6 Измерение температуры расплавов
- 3.7 Измерение температуры в печах
- 3.8 Измерение температуры в труднодоступных местах и агрессивных средах
- 3.9 Измерение температуры в ядерных реакторах
- 4.0 Измерение экстремальных температур
- 4.1 Методы и средства измерения низких и криогенных температур
- 4.2 Методы и средства измерения высоких температур
- 5.0 Термопреобразователи сопротивления
- 6.0 Термоэлектрические преобразователи
- 7.0 Полупроводниковые термопреобразователи
- 8.0 Диэлектрические термопреобразователи
- 9.0 Пирометры
- 9.1 Пирометры полного излучения
- 9.2 Квасимонохроматические пирометры
- 9.3 Пирометры спектрального отношения
- 9.4 Инфракрасные пирометры
- 10.0 Термометры разные
- 10.1 Акустические, ультразвуковые термопреобразователи и термометры
- 10.2 Жидкостные и газовые (бытовые, медицинские, метеорологические) термометры
- 10.3 Магнитные термометры
- 10.4 Шумовые термометры
- 10.5 Манометрические термометры
- 10.6 Термоиндикаторные вещества, краски, жидкие кристаллы
- 10.7 Облученные кристаллы
- 10.8 Ядерно-резонансные термометры
- 10.9 Дилатометрические термометры
- 11.0 Цифровые термометры
- 12.0 Нормативно-техническая документация

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

ВИНИТИ Всесоюзный ин-т научной и технической информации
ВНИИКИ Всесоюзный научно-исследовательский ин-т технической информации, классификации и кодирования
ВНИИМ Всесоюзный научно-исследовательский ин-т метрологии
ВНИИМИУС Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологии и управляющих систем
ВНИИПТИз электроугольных изделий Всесоюзный научно-исследовательский и проектно-технологический ин-т электроугольных изделий
ВНИИФТРИ Всесоюзный научно-исследовательский ин-т физико-технических и радиотехнических измерений
ВНИИЭП Всесоюзный научно-исследовательский ин-т электроизмерительных приборов
ВПИ Волгоградский политехнический ин-т
ДАН СССР Доклады АН СССР
ЖПХ Журнал прикладной химии
ЖЭТФ Журнал экспериментальной и теоретической физики
ИКА Измерение, контроль и автоматизация
ИТМО Ин-т тепло- и массообмена АН БССР
ИФ Ин-т физики
ИФЖ Инженерно-физический журнал
ИФМ УНЦ АН СССР Ин-т физики металлов Уральского научного центра АН СССР
КАИ Казанский авиационный ин-т
КИТ Контрольно-измерительная техника
КПИ Киевский политехнический ин-т
ЛПИ Ленинградский политехнический ин-т
Кр.ПИ Краснодарский политехнический ин-т
ЛДНТП Ленинградский дом научно-технической пропаганды
ЛИТМО Ленинградский ин-т точной механики и оптики
ЛЭТИ Ленинградский электротехнический ин-т
МАП Механизация и автоматизация производства
МАУ Механизация и автоматизация управления
МДНТП Московский дом научно-технической пропаганды
МИРЭА Московский ин-т радиотехники, электроники и автоматики
МЭИ Московский энергетический ин-т
НПИ Новочеркасский политехнический ин-т
ОНТИ Объединение научно-технических издательств
ОПИ Омский политехнический ин-т
ПСА Приборы и средства автоматизации
ПСУ Приборы и системы управления
ПТЭ Приборы и техника эксперимента
СО АН СССР Сибирское отделение АН СССР
ТВТ Теплофизика высоких температур
ТПИ Тульский политехнический ин-т
УНИ Уфимский нефтяной ин-т
УФЖ Украинский физический журнал
ФАН Филиал АН СССР
ФТИНТ Физико-технический ин-т низких температур
ХАИ Харьковский авиационный ин-т
ХПИ Харьковский политехнический ин-т
ЦНИИТЭИ приборостроения Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований приборостроения
ЦНИИТЭ нефтехим Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности
ЯКР Ядерно-квадрупольный резонанс

1. 4.0 *Абилов Г. С.* Исследование термометров для измерения низких температур в магнитных полях.— Тр. ВНИИФТРИ, 1975, вып. 21, с. 49—55.
2. 6.0; 3.6 *Абрамов В. Н., Карпенко Э. Н.* Термопара для длительного непрерывного измерения температуры железоуглеродистого расплава.— Завод. лаб., 1975, 41, № 4, с. 466.
3. 10.6 *Абрамович Б. Г.* Термоиндикаторы и их применение.— М.: Энергия, 1972.— 224 с.
4. 10.6 *Абрамович Б. Г., Картавец В. Ф.* Цветовые индикаторы температуры.— М.: Энергия, 1978.— 214 с.
5. 4.0; 3.1 *Аврошкин Е. С., Никулин В. Б.* Низкотемпературный радиометр с коническим светопроводом— ПТЭ, 1979, № 1, с. 242—243.
6. 3.5 *Ануфриев А. А., Беляков С. Д., Крыжко Л. К.* Метод трех термоприемников для измерения температуры газа.— Метрология, 1982, № 8, с. 29—34.
7. 3.8 *Арсеньев Л. В., Епифанов В. М., Кантерев А. С., Полищук В. Г.* Термометрирование поверхности тонкостенных и оболочковых лопаток стационарных ГТУ.— Пром. теплотехника, 1982, 4, № 5, с. 35—38.
8. 3.9 *Азизов А. М., Гончарук В. П.* Исследование параметрических эффектов в сложных пленочных термоприемниках при измерении температуры турбулентных потоков.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 157, с. 29—35.
9. 1.4 *Азизов А. М., Гордов А. Н.* Точность измерительных преобразователей.— Л.: Энергия, 1975.— 256 с.
10. 5.0; 7.0; 11.0 *Алдонин Г. М.* Многоканальный прибор для цифровой регистрации температуры.— В кн.: Радиотехника, тонкие магнитные пленки, вычислительная техника. Красноярск: ИФ СО АН СССР, 1973, ч. 2, с. 228—233.
11. 9.0 *Александров В. Е.* Яркостный пирометр для регулирования температуры в отражательных печах.— МИРЭА, 1978, № 1, с. 231—240.
12. 1.4 *Алексеев Е. Л.* Погрешности преобразования при групповой унификации различных по параметрам сигналов первичных преобразователей в системах централизованного контроля (СЦК) температуры.— Метрология, 1976, № 4, с. 44—49.
13. 10.6 *Алексеев Н. М.* Применение жидкокристаллических термоиндикаторов для исследования двумерных температурных полей.— В кн.: 2-я Всесоюз. конф. по методам аэрофиз. исслед. (Новосибирск, 1979 г.). Минск: ИТМО, 1979, с. 7—9.
14. 4.2; 5.0 *Алиев Ф. З.* Новый платиновый термометр сопротивления для измерения высоких температур.— Измер. техника, 1964, № 6, с. 21—22.
15. 1.1; 5.0; 6.0 *Алиев Ф. З.* О точности воспроизведения эталонов средних температур в странах СЭВ.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 171, с. 6—11.
16. 5.0 *Алиев Ф. З.* Применение низкоомных термометров сопротивления для воспроизведения международной температурной шкалы в области 630—1063 °С.— В кн.: Исследования в области точных тепловых измерений: Тр. ВНИИМ, 1955, вып. 25, с. 35—43.
17. 5.0 *Альбицкий Н. М., Басков Ю. Н., Стукман Г. Н.* Измеритель малых отклонений температуры.— В кн.: Средства контроля и регулирования. Л.: Химия, 1974, с. 57—63.

18. 1.1; Амброк Г. С., Головань Е. С., Королева Е. А. и др. Методы и аппаратура для осуществления температурной шкалы по тепловому излучению в широком спектральном интервале.— В кн.: Материалы 3-го Всесоюз. совещ. по лучистому теплообмену (Краснодар, 1975 г.). Краснодар : КрПИ, 1975, с. 125—131.
19. 1.1; Амброк Г. С. Некоторые интегральные соотношения в пирометрии.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1977, вып. 207, с. 48—53.
20. 1.1; Амброк Г. С. Расчет температурной шкалы пирометра, работающего в широком спектральном интервале.— Измер. техника, 1976, № 12, с. 41—42.
21. 7.0 Аммер С. А., Елисеев В. А., Татаренков А. Ф. и др. Датчики температуры на основе нитевидных кристаллов кремния.— ПТЭ, 1974, № 4, с. 202—203.
22. 7.0 Анатычук Л. Н., Лах В. И., Лусте О. Я. и др. Использование анизотропии электропроводности полупроводниковых кристаллов в термометрии.— ПСУ, 1979, № 3, с. 18—19.
23. 6.0 Анатычук Л. Н. Термоэлементы и термоэлектрические устройства : Справочник.— Киев : Наук. думка, 1979. 766 с.
24. 1.0; Андрусенко А. М., Иосельсон Г. Л., Кравченко В. Ф. и др. Широкоапертурные СВЧ излучатели.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1974, вып. 164, с. 64—71.
25. 6.0; Аникин А. Я. К анализу метрологических характеристик ВПТ.— В кн.: Экспериментальные методы термостойкости газотурбинных двигателей. Харьков : ХАИ, 1973, вып. 1, с. 25—32.
26. 4.2 Ануфриев А. А., Беляков С. Д. Измерение высоких стационарных температур методом двух термодатчиков.— Измер. техника, 1975, № 1, с. 61—62.
27. 3.5; Ануфриев А. А., Беляков С. Д. Термозонд для измерения высоких стационарных температур газа.— Измер. техника, 1979, № 9, с. 42—43.
28. 7.0; Анферов В. П., Гречишкин В. С., Круповер М. И. Автоматический ЯКР-термометр на полевых транзисторах.— ЯКР, 1977, вып. 1, с. 98—104.
29. 3.8; Арбенина Л. П., Иосельсон Г. Л., Ландер В. А. и др. Исследование метода измерения истинного значения электронной температуры плазмы по ее микроволновому излучению.— Тр. метрол. ин-тов СССР/Харьк. НИИМ, 1973, вып. 10, с. 146—157.
30. 4.1 Ардашев М. П., Лебедев В. И., Лукманов В. С. и др. Криотронный преобразователь температуры.— Изв. вузов. Приборостроение, 1979, 22, № 5, с. 92—95.
31. 9.0 Аристов В. В., Конжуков Ф. И. Сканирующий прибор для бесконтактного измерения температуры.— Измер. техника, 1980, № 7, с. 47—49.
32. 6.0 Артеменко В. М. Вихревой измеритель температуры.— Дефектоскопия, 1976, № 3, с. 124—126.
33. 7.0 Артемьев В. Я. Измерительный преобразователь температуры — частота на микросхеме с кварцевым термочувствительным резонатором.— Изв. вузов. Приборостроение, 1974, 17, № 12, с. 9—12.

34. 5.0 *Артемьев В. Я., Бадишер Е. Я., Старосельцева Е. А. и др.* Миниатюрные терморезисторы из литого микропровода, их исследование и применение.— Изв. ЛЭТИ, 1973, вып. 133, с. 109—119.
35. 6.0 *Артемьева Л. С., Гришков О. В.* Функциональный узел для линеаризации сигналов термопар.— В кн.: Методы расчета и конструирования средств электроизмерительной техники. Л.: ВНИИЭП, 1978, с. 40—48.
36. 4.1; 5.0; 6.0 *Асперов Д. Н., Абилов Г. С., Альшин Б. И.* Измерение низких температур в присутствии сильных магнитных полей.— Измер. техника, 1977, № 4, с. 39—44.
37. 1.0; 4.1 *Астров Д. Н., Белянский Л. Б.* Проблемы метрологического обеспечения низкотемпературной термометрии.— Там же, 1974, № 7, с. 25—28.
38. 4.1 *Астров Д. Н.* Измерение температур ниже 1,5 К.— Там же, 1976, № 5, с. 45—48.
39. 10.5 *Ахмеров А. Ф., Нифтахов Э. З.* Исследование некоторых вопросов интенсификации проектирования и производства манометрических термосистем.— Тр. КАИ, 1975, вып. 175, с. 89—93.
40. 1.1; 9.1 *Бабушкин В. В., Долгих И. Н., Лидова И. В.* Излучатель в виде модели абсолютно черного тела — образцовое средство измерений в инфракрасной технике.— Измер. техника, 1979, № 4, с. 68—70.
41. 10.9; 3.7 *Баевский П. Я., Ильичев Ю. Д., Новик М. А. и др.* Измерение температуры в промышленных печах графитизации дилатометрическими термометрами.— Тр. ВНИИПТИэлектроугольных изделий, 1975, вып. 3, с. 203—206.
42. 6.0 *Байко А. Ф., Бардыло В.-М. И., Ковальчук Н. Г.* Характеристические кривые термоэлектрических преобразователей, изготовленных из кабеля КТМС.— КИТ, 1979, вып. 25, с. 155—157.
43. 11.0; 5.0 *Балдин Б. Н., Василина М. В., Сейфулина А. В.* Выбор параметров преобразователя сопротивления — сдвиг фаз цифрового измерителя температуры.— В кн.: Измерение, контроль и автоматизация в нефтяной и газовой промышленности. Киев: Техника, 1974, с. 121—126.
44. 11.0 *Балдин Б. Н., Василина М. В., Шамбергер Г. А.* Многоточечный цифровой измеритель температуры.— Науч.-темат. сб. Уфим. нефт. ин-та, 1976, вып. 35, с. 123—127.
45. 6.0 *Бальцевич Я. А., Горшков В. Г.* Многоэлектродный ввод термопар в вакуумный объем.— ПТЭ, 1975, № 5, с. 237—238.
46. 1.4; 6.0 *Банников А. И., Наумов Ю. Н., Мацык С. В. и др.* Трехканальный корректор динамической погрешности термопар.— Измер. техника, 1978, № 12, с. 47—48.
47. 5.0 *Бардыло А.-П. И., Бардыло В.-М. И., Лах О. И. и др.* Измерительная схема прибора для измерения отношения температур.— В кн.: Новые исследования в термометрии. Львов: Вища школа, 1974, с. 106—107.
48. 9.2 *Бардыло Т. И., Лах В. И.* Магнитоэлектрический двухрабочный прибор для осуществления подавления нуля в схеме оптического пирометра.— Автоматика и приборостроение, 1960, № 4, с. 81—83.
49. 1.4; 5.0 *Барковский Ю. М., Горбунов Н. И.* Автоматический мост с бесконтактным компенсирующим элементом.— Изв.

- вузов. Приборостроение, 1976, вып. 19, № 10, с. 28—31.
50. 5.0 Барковский Ю. М., Горбунов Н. И. Преобразователь температуры в постоянный ток.— ПСУ, 1977, № 6, с. 32—33.
 51. 9.4; Бахир Л. П., Левашенко Г. И. Скоростной инфракрасный
3.5 спектропирометр для исследования пламени конденсированных систем.— Физика горения и взрыва, 1976, вып. 12, № 6, с. 890—896.
 52. 1.1 Бедфорд Р., Дофине Т. М., Престон Томасс Х. Измерение температуры.— В кн.: Приборы и методы физического металловедения. М.: Мир, 1973, вып. 1, с. 9—131.
 53. 6.0 Бейлин В. М. Влияние термоэлектрической неоднородности на градуировочную характеристику термопар.—
1.3 Науч. тр. н.-и. и проект. ин-та сплавов и обраб. цв. металлов, 1976, вып. 51, с. 87—95.
 54. 5.0 Белов Ю. А., Ковалевская В. В. Аналоговые линейные
1.4 измерительные преобразователи температуры с термометрами сопротивления.— ИКА, 1979, № 3/19, с. 11—17.
 55. 7.0 Белоусов Ю. П., Петренко Ю. Б., Полончук А. М. и др. Простой электронный термометр с полупроводниковым датчиком.— В кн.: Механизмы криповреждения и криозащиты биологических структур. Киев: Наук. думка, 1977, с. 109—110.
 56. 1.3; Белоусова Г. В., Каяндер М. С. Установка УРПД-2 для
9.1 проверки радиационных пирометров от 100 до 2500 °С.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1966, вып. 87, с. 66—69.
 57. 1.3; Белых В. В. К вопросу создания образцовых высокотемпературных излучателей лучистых потоков большой плотности.— Там же, 1975, вып. 183, с. 16—31.
 58. 9.3 Беляев Н. И., Молодкин В. И., Охапкин К. Т. Применение автоматических спектральных пирометров в пирометаллургии меди и никеля.— Цв. металлы, 1974, № 9, с. 12—13.
 59. 1.1; Белянский Л. Б. Температурная зависимость сопротивления платины ПП-2, применяемой для изготовления промышленных низкотемпературных термометров.— Измер. техника, 1977, № 4, с. 44—47.
 60. 1.3; Белянский Л. Б., Ширевская Д. И. Методы и средства проверки образцовых низкотемпературных платиновых термометров сопротивления.— Там же, 1977, № 4, с. 48—49.
 61. 9.1 Березовский Ю. Н., Костычев Ю. В. Переносные пирометры типа РП-МТ для измерения температуры поверхности металла.— Завод. лаб., 1974, 40, № 4, с. 432.
 62. 1.2 Беспалов Ю. Б., Жагулло О. М. Влияние пространственного положения металлической ленты на погрешность измерения ее температуры и излучательной способности.— Метрология, 1975, № 4, с. 48—55.
 63. 6.0; Бжозовский В., Суковер Ш., Енджеец Г. Динамическая термопара для измерения плазмы до 4000 °С.— В кн.: Низкотемпературная плазма. М.: Мир, 1967, с. 293—302.
 64. 6.0; Библиография по термоэлектричеству за 1961—1968 гг.—
2.1 Л.: Наука, 1971.— 292 с.
 65. 5.0 Биронт Н. П. О необходимости нормирования значения измерительного тока термометров сопротивления.— Измер. техника, 1976, № 6, с. 73—74.

66. 10.8 *Благитко Б. Я., Борис Я. В., Лах В. И.* О воспроизводимости показаний ЯКР-термометра.— В кн.: Новые исследования в термометрии. Львов: Вища школа, 1974, с. 137—141.
67. 9.0 *Блох А. Г.* Основы теплообмена излучением.— М.: Госэнергоиздат, 1962.— 331 с.
68. 5.0 *Богомолов В. А., Алиев М. Ю., Асадов С. М.* Электротермометр для замера температуры хлопка-сырца в буре.— Хлопковая пром-сть, 1975, № 3, с. 26—27.
69. 10.8 *Богуславский А. А., Бобков Ю. Н., Лотфуллин Р. Ш. и др.* Импульсный ЯКР-термометр.— Завод. лаб., 1976, 42, № 4, с. 461—462.
70. 6.0 *Богуславский А. М.* Сварка термопар с молибденовыми штифтами.— ПТЭ, 1975, № 5, с. 238.
71. 9.0 *Бойко В. И., Щербина Г. С.* Исследование динамической точности фотоэлектрического пирометра.— МАП, 1978, № 10, с. 31—32.
72. 3.4 *Болилый Г. Ф., Мельников Д. А., Туданов О. В. и др.* Измерение температуры вращающихся деталей с независимой компенсацией холодных спаев.— Изв. вузов. Приборостроение, 1978, вып. 21, № 5, с. 119—122.
73. 3.4; 1.4; 9.2 *Бондар В. Н.* О погрешностях оптического датчика температуры вращающихся частей электромашин.— Вестн. КПИ. Сер. Приборостроение, 1975, № 5, с. 87—90.
74. 4.1 *Бондар Б. А., Федоренко Г. М., Шаревский Б. А.* Передача информации по оптическому каналу связи в термометрии вращающихся криогенных систем.— ПСУ, 1971, № 3, с. 37—38.
75. 8.0; 11.0 *Борис Я. В., Кристаль Б. В.* Кварцевый цифровой термометр.— ПСУ, 1978, № 12, с. 28—29.
76. 9.0 *Боярский Л. А., Ефремова Р. Н.* К вопросу об эффективной длине волны спектропирометра.— В кн.: Работы по физике «твердого тела». Новосибирск: Наука, 1967, 211 с.
77. 6.0 1.4 *Брагин Б. К., Павлов Б. П.* Влияние термоэлектрической неоднородности электродов дифференциальной термопары на ее показания.— Измер. техника, 1976, № 6, с. 71—72.
78. 6.0; 1.4 *Брагин Б. К.* О неоднородности термоэлектродных платиновых и платинородиевых проволок.— Тр. ин-тов Ком. стандартов, 1961, вып. 51, с. 85—89.
79. 6.0; 1.3 *Брагин Б. К., Гордов А. Н.* О сходимости результатов градуировки образцовых термопар 1-го разряда в институтах Комитета стандартов.— Там же, с. 82—85.
80. 6.0 *Брагин Б. К., Павлов Б. Л.* Термоэлектрическая неоднородность термоэлектродных проволок.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 181, с. 28—39.
81. 9.2 *Бражниченко Г. Н.* Новые расчетные формулы оптической пирометрии.— В кн.: Исследования в области температурных измерений: Тр. ВНИИМ, 1966, вып. 87, с. 58—65.
82. 9.2 *Бражниченко Г. Н.* Яркостные температуры горизонтальных моделей черного тела.— Там же, 1972, вып. 131, с. 59—71.
83. 9.0; 3.5 *Бражниченко Г. Н., Беспалов Ю. Б., Гоголев Н. Л.* Быстродействующий спектрометр для измерения температуры импульсных плазменных излучателей.— Там же, 1975, вып. 171, с. 26—32.

84. 1.3; Бражниченко Г. Н., Гоголев Н. Л., Долицкий И. Л. и др.
3.5 Аппаратура для аттестации импульсных плазменных источников измерения.— Измер. техника, 1975, № 11, с. 61—62.
85. 9.4 Брамсон М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел.— М.: Наука, 1965.— 223 с.
86. 9.4 Брамсон М. А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению.— М.: Наука, 1964.— 320 с.
87. 6.0; Браунинг У. Е., Миллер К. Е. Вычисление изменения состава термопар под действием излучения.— В кн.: Измерение температур в объектах новой техники. М.: Мир, 1965, с. 53—65.
88. 3.9; Браунинг У. Е., Хемфилл Х. Л. Термопара для измерения температуры поверхности тепловыделяющих ядерных элементов.— В кн.: Измерение температур в объектах новой техники. М.: Мир, 1965, 280 с.
89. 4.1 Бродский А. Д. Новые методы измерения низких температур.— М.; Л.: Изд-во стандартов, 1962.— 136 с.
90. 6.0 Будзинский О. З., Моргунова А. А., Сведе-Швец Н. И. Вольфрам-молибденовая термопара ЦНИИЧМ-1.— М.: Машгиз, 1956.— 18 с.
91. 5.0 Булыга С. Г., Телеи О. П., Шморгунов Е. И. и др. Малогабаритный термометрический мост.— КИТ, 1978, вып. 23, с. 135—137.
92. 3.4 Буров А. В., Владимиров Э. А., Шевелкин С. Д. Термометр для движущихся металлических объектов.— ПСУ, 1980, № 5, с. 27—28.
93. 5.0; Бочковский Р. В. Контактные датчики температуры.— 6.0 М.: Металлургия, 1978.— 237 с.
94. 5.0; Бочковский Р. В., Иванов А. Г., Приступа Ю. П. и др.
3.5 Определение расчетным методом скоростей потока измеряемой среды, вызывающих резонансные колебания термометров сопротивления.— Метрология, 1974, № 7, с. 44—48.
95. 5.0; Бочковский Р. В., Карякина Л. А., Скородинский Н. А.
1.4 О перегреве термометров сопротивления измерительным током.— Там же, с. 49—54.
96. 2.0; Бочковский Р. В., Вигдорович В. Н., Колесник Е. А. и др.
6.0 Приборы для измерения температуры контактным способом.— Львов: Вища школа, 1978.— 208 с.
97. 6.0 Валеева Г. Х. Компенсационное устройство к приборам, измеряющим э.д.с. термопары.— Науч.-темат. сб. Уфим. нефт. ин-та, 1976, вып. 35, с. 94—99.
98. 5.0 Варфоломеев С. Ф. Малогабаритный платиновый термометр с повышенной механической точностью.— Тр. ВНИИФТРИ, 1975, вып. 21, с. 102—106.
99. 4.1; Варфоломеев С. Ф. Новые высокоточные низкотемпературные термометры сопротивления.— Измер. техника, 1979, № 4, с. 67—68.
100. 4.1; Варфоломеев С. Ф. Широкодиапазонные углеродные термометры для низких температур.— ПТЭ, 1977, № 1, с. 262—264.
101. 7.0 Василевская В. Н., Винецкий Р. М., Миселюк Е. Г. и др. Германиевый термопреобразователь сопротивления для температур 20—77 К.— Полупроводниковая техника и микроэлектроника, 1967, вып. 2, с. 13—22.

102. 6.0 *Василенко А. Е., Макковеев А. М., Гусев С. Ф. и др.* Технологические методы повышения качества термоэлектрических датчиков.— ПСУ, 1976, № 9, с. 47.
103. 6.0 *Васильев Б. В.* Особенности конструирования малоинерционного вакуумного радиационного термоэлемента с выделенной приемной площадью.— Изв. ЛЭТИ, 1974, вып. 142, с. 12—16.
104. 9.2; 4.0 *Васильев Б. В., Парамонов А. М.* Низкотемпературный узкоугольный пирометр с оптическим визированием и зеркальной оптикой.— Там же, с. 25—27.
105. 6.0 *Васильев Б. В.* Пленочные радиационные термоэлементы с подложкой из оксидной пленки на алюминии.— Там же, с. 8—11.
106. 1.4; 5.0 *Васильев Е. В.* Устройство для контроля статических характеристик технических термопреобразователей сопротивления неразборной конструкции.— Измер. техника, 1979, № 6, с. 41—42.
107. 1.3 *Васильев Е. В., Мардин В. В., Михайленко В. Д.* О нормировании метрологических характеристик технических термометров.— Там же, 1977, № 7, с. 28—29.
108. 6.0 *Васильева И. В., Гомельский К. З., Добровинский И. Е.* Исследование взаимозаменяемости промышленных термоэлектрических термометров.— Там же, 1977, № 8, с. 69—70.
109. 1.4; 5.0 *Васильева Л. Л.* Повышение точности измерения температуры термометрами сопротивления.— Метрология, 1975, № 6, с. 60—64.
110. 1.1 *Вдовин Н. С., Вугман С. М., Ким Р. В. и др.* Образцовая температурная лампа накаливания.— Измер. техника, 1976, № 12, с. 46—47.
111. 1.1 *Вдовин Н. С., Грачева Т. И., Никулин М. М.* Новые температурные лампы с вольфрамовым ленточным телом накала.— Там же, 1979, № 9, с. 43—44.
112. 1.4; 5.0 *Верасич Е. А.* Некоторые статические погрешности при измерении температуры с помощью платиновых термометров сопротивления.— Теплофизика и теплотехника, 1975, вып. 29, с. 135—139.
113. 1.4; 5.0 *Верасич Е. А., Гринев В. Д., Кочан В. А.* Учет параметров платиновых термометров сопротивления в схеме автокомпенсаторов переменного тока.— Метрология, 1974, № 7, с. 38—44.
114. 8.0 *Верес Г. И.* О способе измерения температуры по декрептографическому эффекту газожидких включений в кварце.— Завод. лаб., 1976, 42, № 10, с. 1212—1213.
115. 7.0 *Викулин И. Н., Глауберман М. А., Викулина Л. Ф.* Частотный преобразователь температуры на однопереходном транзисторе.— ПСУ, 1978, № 4, с. 40.
116. 4.1 *Винецкий Р. М., Миселюк О. Г., Поletaева И. Ф., Фортунатова Н. Н.* Застосування германію, легованого гелієм та цинком, для низькотемпературної термометрії.— УФЖ, 1968, 13, № 6, с. 1052—1054.
117. 10.1 *Власов И. И., Ишал В. А.* Частотные характеристики струйно-акустического измерительного преобразователя температуры газа.— Газодинамика двигателей летательных аппаратов / Тр. КАИ, 1978, № 1, с. 77—81.
118. 9.4 *Власов Н. И., Каплан М. Л.* Методы измерения ИК-излу-

- чения для устранения с излучающей поверхности.— Измер. техника, 1975, № 12, с. 41—43.
119. 1.3 Власов Ю. Н., Зеликсон Д. Л., Трохан А. М. О динамической градуировке контактных измерителей температуры в потоке жидкости.— ИФЖ, 1974, № 5, с. 825—831.
 120. 3.9 Влияние ядерных излучений на материалы / Под ред. Дж. Хервуда.— Л.: Судпромгиз, 1961.— 300 с.
 121. 11.0; 6.0 Волков В. Г. Быстродействующая система для машинного сбора и обработки сигналов термодатчиков.— Экспериментальные методы термостойкости газотурбинных двигателей. Харьков: ХАИ, 1975, вып. 2, с. 57—61.
 122. 9.0 Волчек А. Д., Джайзаков В. М. Фотоэлектрический пирометр излучения.— ПТЭ, 1981, № 3, с. 242—244.
 123. 11.0; 6.0 Воробьев И. В., Саватеев А. В. Физические основы температурных измерений методом ядерного квадрупольного резонанса.— ПСУ, № 7, 1979, с. 14—16.
 124. 3.8 Воробьев О. С., Иосельсон Г. А., Ландер В. А. и др. Измерение распределения электронной температуры плазмы в закрытых камерах.— Метрология, 1974, № 2, с. 9—13.
 125. 3.2 Вошни Е. Динамика измерительных цепей.— М.: Энергия, 1969.— 288 с.
 126. 10.1 Воронин В. М., Дорукина Н. Б. Акустический преобразователь температуры в частоту.— Тр. ЛПИ, 1975, № 342, с. 46—48.
 127. 2.1 Выдающиеся физики мира: Рек. указ.— М.: Б-ка им. В. И. Ленина, 1958.— 435 с.
 128. 1.1; 5.0 Высокоточная резистивная термометрия.— Брит. пром-сть и техника, 1976, № 4, с. 159.
 129. 5.0; 11.0 Выходной блок цифрового измерительного центра для термометров сопротивления С-100.— Науч. приборы, 1974, № 3, с. 81—83.
 130. 11.0 Вятч Л. А. Сканирующее устройство для измерения температурных полей.— В кн.: Применение оптико-электронных приборов в контрольно-измерительной технике. М.: МДНТП, 1976, с. 94—99.
 131. 5.0; 1.0 Гаврилова И. С., Чекулаев В. П., Цырлина Н. Г. Разработка, изготовление и аттестация платиновых термометров сопротивления новой конструкции.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 171, с. 51—54.
 132. 3.8; 7.0 Герасимов В. Я. Прибор для определения температуры внутри деформируемого объема пластически формонизменяемого тела.— Завод. лаб., 1978, 44, № 11, с. 1374—1375.
 133. 1.4; 3.5 Герасимова С. Д. Анализ погрешности, возникающей при автоматической обработке оптических интерферограмм плазмы.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1974, вып. 164, с. 102—109.
 134. 3.5 Геращенко О. А., Лебедев Д. П., Уваров В. В. Исследование потоков газа с помощью термоградиентометра.— Завод. лаб., 1978, 44, № 5, с. 554—556.
 135. 2.1 Геращенко О. А. Основы теплотермии.— Киев: Наук. думка, 1971.— 192 с.
 136. 2.1 Геращенко О. А., Федоров В. Г. Тепловые и температурные измерения.— Киев: Наук. думка, 1965.— 304 с.
 137. 3.4 Геращенко О. А., Скрипник С. И., Цеккоза Н. М. и др. Устройство для измерения температуры движущихся поверхностей.— Завод. лаб., 1977, 43, № 1, с. 55—56.

138. 5.0 Гиль Б. И. Термометры сопротивления из монокристаллических тугоплавких металлов.— В кн.: Новые исследования в термометрии. Львов : Вища школа, 1974, с. 36—38.
139. 3.3 Гиль Б. И. Длительное измерение температуры огнеупоров воздухонагревателей доменных печей.— ПСУ, 1975, № 2, с. 44—45.
140. 1.4; 5.0 Гиль Б. И., Лах В. И., Мазурак Ю. А. и др. Определение погрешностей от проводимости изоляционной керамики при измерении температуры термометрами сопротивления.— В кн.: Новые исследования в пирометрии. Львов : Вища школа, 1974, с. 3—13.
141. 1.3; 10.6 Гладырин П. С., Иванова Т. А., Пак В. Методика и аппаратура для градуировки тонкопленочных жидкокристаллических термодатчиков.— Измер. техника, 1975, № 3, с. 61—62.
142. 10.6 Гладырин П. С., Иванова Т. А., Пак В. Определение постоянной термической инерции тонкопленочных термодатчиков на основе жидких кристаллов при импульсном нагреве.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1974, вып. 148, с. 31—36.
143. 1.4; 9.3 Глазман Е. Д. Порог чувствительности цветового пирометра и его зависимость от типа приемника излучения.— В кн.: Приборы для исследования физических свойств материалов. Киев : Наук. думка, 1974, с. 122—127.
144. 8.0; 11.0 Голембо В. А., Сидоров М. Н., Котляров В. Л. Цифровой кварцевый термометр.— ПСУ, 1980, № 3, с. 29—31.
145. 8.0; 11.0 Голембо В. А., Котляров В. Л., Швецкий Б. И. Пьезокварцевые аналого-цифровые преобразователи температуры.— Львов : Вища школа, 1977.— 172 с.
146. 3.5 Голобородько В. Г., Исельсон Р. Л., Пушкарев Г. П. Аппаратура для диагностики плазмы.— Метрология, 1974, № 4, с. 3—8.
147. 10.5 Головаченко А. Н. Дроссельные пневматические преобразователи для измерения температуры.— М. : Энергия, 1974.— 95 с.
148. 7.0 Гольфенштейн П. Н. Измерение температуры электронных эмиттеров в равновесных и неравновесных диодных системах в вакууме.— Метрология, 1975, № 10, с. 57—62.
149. 10.2 Гордов А. Н., Киренков И. Н. Азотный газовый термометр постоянного объема.— В кн.: Исследования в области точных тепловых измерений : Тр. ВНИИМ, 1955, вып. 25, с. 134.
150. 3.5 Гордов А. Н. Измерение температур газовых потоков.— Л. : Mashgiz, 1962.— 136 с.
151. 1.1; 3.6 Гордов А. Н., Аржанов А. С., Дийков У. В. Новое определение температуры затвердевания золота.— В кн.: Сообщения ВНИИМ Консультативному комитету по термометрии : Тр. ВНИИМ, 1960, вып. 49, с. 30.
152. 9.0 Гордов А. Н. Основы пирометрии.— 2-е изд., доп. и перераб.— М. : Металлургия, 1971.— 447 с.
153. 1.1 Гордов А. Н. Температурные шкалы.— М. : Изд-во стандартов, 1966.— 48 с.
154. 5.0; 1.4; 6.0 Гордов А. Н., Малков Я. В., Эргард Н. Н., Ярышев Н. А. Точность контактных методов измерения температуры.— М. : Изд-во стандартов, 1975.— 232 с.
155. 6.0 Гордов А. Н., Добровинский И. Е., Лах В. И. Актуальные

- задачи современной термометрии.— ПСУ, 1980, № 2, с. 13—15.
156. 1.3; Григорьев Л. С. Особенности градуировки ВПТ и ее погрешности.— В кн.: Экспериментальные методы термочувствительности газотурбинных двигателей. Харьков : ХАИ, 1973, вып. 1, с. 41—47.
 157. 1.4; Григорьев Л. С., Симбирский Д. Р., Олейник А. В. Устранение погрешностей ВПТ, вызываемых паразитными термопарами в измерительной цепи.— Там же, с. 47—52.
 158. 9.0; Гриднев С. П., Реформатский И. А. Метод бесконтактного измерения действительной температуры нагретых тел по их тепловому излучению.— В кн.: Техника радиационного эксперимента. М.: Атомиздат, 1974, вып. 2, с. 22—24.
 159. 1.3; Гришков А. Д., Гольдштейн И. И., Сирота А. М. О некоторых результатах обработки градуировок термопар.— Метрология, 1974, № 4, с. 22—27.
 160. 6.0 Гришков О. В., Завадский Н. Н. Серия измерительных преобразователей Ш72, Ш72-И для термопар.— ПСУ, 1979, № 8, с. 29—30.
 161. 5.0; Грубант Л. Кремниевые термометры сопротивления.— Науч. приборы, 1974, № 5, с. 35—38.
 162. 11.0 Грудник В. С., Кучмасов В. И., Ломтев Е. А. и др. Многоточечная контрольно-измерительная система с выносными цифровыми табло.— ПТЭ, 1979, № 4, с. 279.
 163. 11.0 Губанова Ю. Ф., Марков А. И., Непримеров Н. Н. и др. Электронный термометр с линейной характеристикой.— Геофиз. аппаратура, 1974, вып. 55, с. 133—135.
 164. 10.4 Губский Б. И. Простой шумовой термометр непосредственной оценки.— Стандартизация и измер. техника, 1977, № 3, с. 33—38.
 165. 10.4 Губский Б. И. Шумовой термометр, нечувствительный к температурному коэффициенту сопротивления термочувствительного элемента.— Изв. вузов. Приборостроение, 1977, вып. 20, № 8, с. 110—114.
 166. 1.3 Гуткин Б. С. Метод электрической поверки пленочных терморезисторов.— Измер. техника, 1978, № 4, с. 48—50.
 167. 6.0; Данишевский С. К., Гуревич А. М., Смирнова Н. И. и др. Разработка и внедрение в промышленность термопар для высокотемпературных измерений.— В кн.: Рений. М.: Наука, 1964, с. 212—215.
 168. 6.0 Данишевский С. К., Ипатова С. И., Олейников П. П. и др. Термометры из сплавов молибдена с рением.— Измер. техника, 1966, № 4, с. 50—54.
 169. 6.0 Данишевский С. К., Олейникова Л. Д., Олейников П. П. и др. Градуировочные характеристики вольфрам-рениевых термопар ВРЗ/20.— Там же, 1968, № 7, с. 20—21.
 170. 6.0 Данишевский С. К., Олейникова Л. Д., Павлова Е. И. и др. Применение сплавов вольфрам-рений для термопар.— В кн.: Рений в новой технике. М.: Наука, 1970, с. 190—194.
 171. 4.2; Данишевский С. К., Сведе-Швец Н. И. Высокотемпературные термопары.— М.: Металлургия, 1977.— 232 с.
 172. 2.0 Датчики для измерения температуры в промышленности.— Киев : Наук. думка, 1972.— 224 с.

173. 1.4; Дедекаев Т. Т., Крюков И. И. Поверка зонда термопары в рабочих условиях.— Завод. лаб., 1978, 44, № 10, с. 1229—1230.
174. 11.0; Денисов В. П., Лойко В. И. Цифровой кварцевый термометр.— Сб. науч. тр. Перм. политехн. ин-та, 1977, № 199, с. 136—139.
175. 9.0 Деннерт Н. Н., Коган А. В., Василенко Л. Р. и др. Новый критерий для классификации промышленных пирометров излучения.— ПСУ, 1979, № 5, с. 27—29.
176. 10.6 Джагунов Р. Г., Рафили С. С., Сумианов А. М. и др. О возможностях использования пьезокерамики в преобразователях температуры с частотным выходом.— Изв. вузов. Нефть и газ, 1974, № 2, с. 95—97.
177. 8.0 Джагунов Р. Г., Якубов Р. А., Асадов А. М. О возможности использования пьезоэлектрических биморфных трансформаторов для измерения колебаний температуры в малых пределах.— Там же, 1977, № 1, с. 89—92.
178. 3.8; Дмитриев В. А., Лесник В. А. Скважинный термометр высокой чувствительности с цифровыми аналоговыми выходами.— Тр. Моск. ин-та нефтехим. и газовой пром-сти, 1977, вып. 127, с. 60—63.
179. 1.0; Добровинский И. Е., Павлов Б. П., Гортенштейн А. Ш. О состоянии метрологического обеспечения измерений температуры термоэлектрическими термометрами при испытаниях металлов.— Измер. техника, 1977, № 2, с. 60—61.
180. 10.6 Долгов В. М. Аналоговая модель жидкокристаллического термоиндикатора.— В кн.: Приборы и методы автоматизированных экспериментальных исследований. Днепропетровск : Изд-во Днепропетр. ун-та, 1976, с. 75—80.
181. 2. Дорфман Я. Г. Всемирная история физики с древнейших времен до конца XVIII века.— М. : Наука, 1974.— 350 с.
182. 2.1 Дорфман Я. Г. Всемирная история физики с начала XIX до середины XX в.— М. : Наука 1979.— 317 с.
183. 6.0; Доценко Ю. Н. Измерение термопарами нестационарных температур в газах в условиях лучистого теплообмена.— Самолетостроение и техника воздуш. флота, 1974, вып. 35, с. 17—22.
184. 6.0; Доценко Ю. Н., Пелепейченко И. П. Об оптимальном соотношении размеров термопар при измерении температуры газа по методу трех термоприемников.— В кн. : Экспериментальные методы термостойкости газотурбинных двигателей. Харьков : ХАИ, 1973, вып. 1, с. 157—159.
185. 7.0 Дроздеин А. М., Седых Н. К., Новокрещенова Е. П. Влияние среды на характеристики терморезисторов на основе нитевидных кристаллов кремния.— Измер. техника, 1979, № 9, с. 44—46.
186. 6.0 Дружинина И. П., Владимирская Г. М., Фрактовникова А. А. Исследование термоэлектродных материалов.— Там же, 1966, № 4, с. 48.
187. 6.0 Дружинина И. П., Фрактовникова А. А., Владимирская Г. М. Термоэлектрические свойства проволоки из монокристаллов вольфрама.— Там же, 1970, № 3, с. 42—44.
188. 6.0 Дружинина И. П., Фрактовникова А. А., Владимирская Г. М. и др. Термоэлектрические свойства тугоплав-

- ких металлов.— В кн.: Сплавы редких металлов с особыми физическими свойствами. М.: Наука, 1974, с. 170—174.
189. 1.3; 1.4 *Друк Р. В.* Повышение точности миниатюрных датчиков температуры.— В кн.: Новые исследования в пирометрии. Львов: Вища школа, 1974, с. 24—26.
 190. 9.3 *Друкер С. А., Черниловская Г. З.* Операторские спектрометры (измерители цветовой температуры).— Техника, кино и телевидение, 1976, № 11, с. 78—83.
 191. 6.0 *Дудкин Е. В., Плотников А. Л.* Исследование естественной термопары как датчика температуры для адаптивных систем управления.— Науч. тр. Волгогр. политехн. ин-та, 1975, вып. 6, с. 150—156.
 192. 3.7 *Дукарский С. М.* Термометрия продуктов доменной плавки.— М.: Металлургия, 1976.— 119 с.
 193. 3.1 *Дульнев Г. Н., Пилипенко Н. В.* Об измерении нестационарных тепловых потоков с помощью тепломеров.— ИФЖ, 1975, 29, № 5, с. 814—820.
 194. 1.4 *Думова Р. Г., Сергеев О. П., Татаришвили Д. А.* О случайных погрешностях измерения малых разностей температур контактными термоприемниками.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1971, вып. 129, с. 228—236.
 195. 5.0 *Дунец В. Б.* Термометрические характеристики платиновых термометров сопротивления.— КИТ, 1976, вып. 20, с. 82—86.
 196. 5.0; 4.2 *Дунец В. Б.* Термометры сопротивления для высоких температур.— ПСУ, 1978, № 3, с. 35—37.
 197. 1.3; 6.0 *Дунашев В. Г., Козыряцкий И. П.* Особенности градуировки термопары магниевых сплав — констант.— Измер. техника, 1975, № 3, с. 91—92.
 198. 6.0 *Дутчак Я. И., Друк Р. В., Киз А. И.* Влияние пластической деформации на термо-э.д.с. сплавов хромель, конпель и алюминель.— Физ.-хим. механика материалов, 1972, № 2, с. 36.
 199. 9.3 *Дяковой Ф. С., Кошельников Г. С., Лазренко И. И.* Цветовой пирометр.— ПСУ, 1968, № 1, с. 52.
 200. 1)1 *Евсеев В. С., Хახалева В. К.* Пневматический измеритель температуры типа ИТП.— Автоматизация и контрольно-измерит. приборы в нефтеперераб. и нефтехим. пром-сти, 1974, № 4, с. 18—20.
 201. 6.0 *Егорова Т. Н., Игнатьев Л. Л., Олеск А. О.* Мощные терморезисторы с положительным температурным коэффициентом сопротивления.— ПСУ, 1975, № 7, с. 43—45.
 202. 9.3 *Ежова Т. Н., Свет Д. Я.* Пирометрическая система РЭД для прецизионного измерения и регулирования цветовой температуры.— В кн.: Приборы для исследования физических свойств материалов. Киев: Наук. думка, 1974, с. 116—122.
 203. 9.3 *Ежова Т. Н., Свет Д. Я.* Система для прецизионного измерения и регулирования цветовой температуры.— Измер. техника, 1974, № 1, с. 72—74.
 204. 5.0 *Еремин Г. Н., Кондратенко В. Г.* Автоматический контактный термометр.— ПТЭ, 1979, № 1, с. 257—260.
 205. 9.3 *Еремин Е. А., Махров Е. Т., Стариков Б. В. и др.* Определение цветовой температуры импульсных источников измерения.— Там же, 1974, № 4, с. 163—164.
 206. 7.0; *Ермилова Л. Н. и др.* Автоматизированная установка

- 5.0; для градуировки полупроводниковых термометров со-
1.3 противления.— Тр. ВНИИФТРИ, 1975, вып. 21, с.
106—109.
207. 9.0 Жагулло О. М. О возможности метода пирометрии двой-
ного спектрального отношения.— Тр. метрол. ин-тов
СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 181, с. 91—97.
208. 5.0 Завгородний А. Д. Исследование стабильности чувстви-
тельности элемента термометра сопротивления из стекла.—
Метрология, 1978, № 11, с. 46—49.
209. 5.0; Заничковская Л. В. Измерение разности температур ком-
3.5 пенсационно-мостовыми схемами с термометрами сопротив-
ления.— Измер. техника, 1974, № 10, с. 45—46.
210. 1.4; Заничковская Л. В. О возможностях повышения точности
5.0; измерения разности температур.— КИТ, 1973, вып. 14,
6.0 с. 47—50.
211. 3.5; Заничковская Л. В. О схемах приборов для измерения раз-
1.4 ности температур с компенсацией погрешностей, обуслов-
ленных нелинейностью характеристик термопреобразо-
вателей.— Метрология, 1975, № 6, с. 54—60.
212. 7.0 Заничковская Л. В., Кочан В. А. Измерение разности тем-
ператур при помощи автоматических мостов с полупро-
водниковыми терморезисторами.— Измер. техника, 1976,
№ 2, с. 82—84.
213. 1.4 Заничковская Л. В., Кочан В. А., Полищук Е. С. О по-
вышении точности измерения разности температур в
электропроводных телах.— В кн.: Новые исследования
в термометрии. Львов: Вища школа, 1974, с. 74—
77.
214. 5.0; Заничковская Л. В., Паляница И. Ф., Мыцых Л. В. и др.
4.1 Малоинерционные платиновые термометры сопротивления
повышенной точности для измерения низких темпера-
тур.— КИТ, 1974, вып. 15, с. 82—86.
215. 5.0 Запорожец В. П. Расчет пневматического термометра со-
противления.— Энергет. машиностроение, 1976, вып. 21,
с. 132—138.
216. 1.4; Засименко В. М., Голюка Н. Б., Самченко Г. П. Использо-
9.0 вание предельных параметров приемников в пирометрах
частичного и полного излучения.— КИТ, 1982, вып.
32, с. 90—94.
217. 6.0 Засименко В. М., Голюка Н. Б. Использование структур-
ных методов для повышения точности пирометрических
показателей частичного и полного излучения.— Там же,
с. 10—17.
218. 7.0 Захаров А. К., Никитин О. В. Датчики температуры на
позисторах.— В кн.: Диэлектрические материалы радио-
электроники. М.: МИРЭА, 1977, с. 180—182.
219. 1.3 Звягольский Ю. С., Варавин И. А., Двадненко В. И. и др.
Градуировка естественных термопар «инструмент — де-
таль» из спеченных материалов.— Тр. Кр. ПИ, 1975,
вып. 69, с. 143—150.
220. 3.4 Зедгинидзе Г. П. Измерение температуры вращающихся
деталей машин.— М.: Машгиз, 1962.— 271 с.
221. 3.1; Зедгинидзе Г. П. Метод обработки результатов динамиче-
7.0 ских измерений температур.— Измер. техника, 1975,
№ 12, с. 22.
222. 5.0 Зеленюк В. К., Пинчевский А. Д., Тарковский Д. Ф.
Импульсное питание электрических термометров сопро-

- тивления.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1971, вып. 129/189, с. 193—198.
223. 4.1; 4.2 *Земенский М.* Температуры очень низкие и очень высокие / Пер. с англ.— М.: Мир, 1968.— 152 с.
224. 2.0; 3.3 *Зимин Г. Ф., Михайлов М. Г., Пугачев Н. С. и др.* Контактные методы и приборы для измерения температур.— М.: Изд-во стандартов, 1980.— 124 с.
225. 5.0; 7.0; 4.1 *Зиновьева К. Н.* Полупроводниковые термометры сопротивления для интервала 300—0,2 К.— ПТЭ, 1979, № 3, с. 214—216.
226. 4.1 *Зиновьева К. Н., Карстенс Г. Э.* Угольные термометры для сверхнизких температур.— Там же, 1974, № 2, с. 249—252.
227. 5.0 *Зинченко Л. А.* Выбор термочувствительных элементов, предназначенных для измерения температуры потока воздуха в канале.— Тр. НПИ, 1976, вып. 325, с. 52—59.
228. 3.4 *Зинченко Л. А., Садигов И. Н., Фандеев Е. И.* Исследование пневмотермометрического метода измерения температуры движущихся лент.— Изв. вузов. Энергетика, 1975, № 9, с. 134—138.
229. 3.4 *Зинченко Л. А., Фандеев Е. И.* О классификации одной разновидности бесконтактных измерителей температуры движущихся поверхностей.— Тр. НПИ, 1976, вып. 325, с. 40—47.
230. 1.1 *Золотушкин А. Б., Жагулло О. М.* Излучатели для исследования степени черноты металлов.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1977, вып. 207, с. 73—76.
231. 11.0 *Зорий В. И., Монастырский З. Я., Серкиз Е. С.* Цифровой времяимпульсный измеритель температуры.— ПСУ, 1978, № 12, с. 21—23.
232. 9.3 *Зубов В. Г., Крымов А. П., Семенистый К. С.* Пирометр для измерения цветовой температуры в широком диапазоне.— Изв. вузов. Приборостроение, 1978, вып. 21, № 5, с. 123—126.
233. 1.4; 7.0 *Зубов В. Г., Семенистый К. С.* Управляемое активное корректирующее звено для коррекции инерционности термоприемников.— Там же, 1973, вып. 16, № 9, с. 107—109.
234. 4.1 *Ибрагимов Р. Ш., Логвиненко С. П., Величко А. А.* Низкотемпературные резистивные датчики на основе монокристаллических слоев раствора $\text{Ge} + \text{Si}$ на керамике.— ПТЭ, 1978, № 4, с. 268—270.
235. 7.0 *Иванов Л. П. и др.* Арсенидогаллиевые диодные датчики температуры.— Там же, 1979, № 1, с. 256—257.
236. 7.0 *Иванов Л. П., Коренман М. Е., Лахтакова В. Г. и др.* Диод для измерения температуры.— Там же, 1976, № 2, с. 247.
237. 3.2; 3.3 *Иванова А. Г., Тартаковский Д. Ф.* Метод определения динамических свойств поверхностных термоприемников.— Метрология, 1975, № 1, с. 50—58.
238. 1.4 *Иванова А. Г., Шокина И. В.* Оценка погрешности измерения температуры при использовании групповых градуировок.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 157, с. 112—117.
239. 3.8 *Иванова Е. П.* Чувствительность широкополосного радиометра микроволнового диапазона с пироэлектрическим детектором.— Тр. метрол. ин-тов СССР/Харьк. НИИМ, 1973, вып. 10, с. 109—205.
240. 3.1 *Иванченко В. П. и др.* Проектирование телескопа пирометра

- полного излучения с рефлекторной оптической системой.— Изв. Сев.-Кавк. науч. центра высш. шк. Сер. техн. наук, 1975, № 3, с. 93—96.
241. 9.1 *Иванченко В. П.* Расчет оптической системы телескопа пирометра суммарной радиации с прямоугольной входной диафрагмой.— Тр. НПИ, 1975, вып. 314, с. 101—109.
 242. 1.3; 6.0 *Иванюк Н. А., Тарасова Н. Я.* Способ градуировки пленочных термпар и их характеристики.— Измер. техника, 1975, № 1, с. 64—65.
 243. 1.3; 1.4 *Ивенский С. Н.* Исследование влияния неравномерности температурного поля излучателя рабочего эталона единицы температуры по шкале интегрального излучения в интервале 300—600 К на его излучение.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 183, с. 46—52.
 244. 9.3 *Ивлев Г. Д.* Измерение цветовой температуры поверхности.— ПТЭ, 1977, № 2, с. 224—225.
 245. 9.0 *Ильин В. М.* Фотоэлектрический пирометр.— Измер. техника, 1974, № 10, с. 49.
 246. 1.3; 4.2 *Идиатуллин З. Г., Постнов В. К., Киргизбаев Д. А.* Высокотемпературная установка для градуировки термозондов.— Гелиотехника, 1976, № 1, с. 44—47.
 247. 6.0; 3.5 *Идиатуллин З. Г., Цибиногин О. Г.* К вопросу измерения температуры газа методом нескольких термпар.— Там же, № 4, с. 38—42.
 248. 1.3 *Идиатуллин З. Г., Цибиногин О. Г., Пылин Б. В.* Универсальный стенд для градуировки термпар и термометров сопротивления.— Тр. ВНИИ экономики, орг. пр-ва и техн.-экон. информ. в газовой пром-сти, 1974, вып. 1/1, с. 182—187.
 249. 3.5 *Измерение температур пламени.*— Сб. ст. / Под ред. А. Е. Кадышевича.— М.: Оборонгиз, 1954.— 190 с.
 250. 1.2; 10.2 *Израилов К. С.* О поправке, обусловленной примесями к термометрическому газу.— Тр. метрол. ин-тов СССР / ВНИИМ, 1978, вып. 216/276, с. 23—31.
 251. 1.1 *Израилов К. С.* О построении шкалы Кельвина газотермическим методом.— Там же, 1977, вып. 207, с. 8—19.
 252. 11.0; 3.5 *Ильинский А. П.* Цифропечатающее устройство для повышения точности измерения электронной температуры плазмы.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ ВНИИМ, 1973, вып. 10, с. 217—227.
 253. 9.1 *Иосельсон Г. Л., Ландер В. А., Лепешкина Н. И.* К вопросу о создании СВЧ эталона плазменных температур. Исследование группового излучателя «черное тело» с широкой аппаратурой на газоразрядных лампах ГШ-2.— Там же, с. 122—135.
 254. 3.5 *Исследования в области диагностики плазмы.*— Там же, 316 с.
 255. 4.2; 3.5 *Исследования в области измерения высоких температур и диагностики плазмы.*— Там же, 1974, вып. 161/224, 161 с.
 256. 1.1; 4.2 *Исследования в области температурных измерений при высоких температурах.*— Там же, 1975, вып. 183, 118 с.
 257. 4.1 *Исследования в области термометрических и теплофизических измерений при низких температурах.*— Тр. ВНИИФТРИ, 1975, вып. 21.—140 с.

258. 1.0; *Исследования в области температурных измерений.*—
2.2 Сб. ст./ Под ред. А. Н. Гордова.— М. ; Л. : Изд-во стан-
дартов, 1961.— 231 с.
259. 1.0; *Исследования в области температурных измерений.*— Сб.
2.2 ст./ Под ред. И. И. Киренкова.— М. : Изд-во стандар-
тов, 1966.— 75 с.
260. 1.0; *Исследования в области температурных измерений.*— Сб.
2.2 ст./ Под ред. А. Н. Гордова.— М. ; Л. : Изд-во стандар-
тов, 1963.— 243 с.
261. 1.0; *Исследования в области температурных измерений :* —
2.2 Сб. ст./ Под ред. И. И. Киренкова.— М. ; Л. : Изд-во
стандартов, 1969.— 270 с.
262. 1.0; *Исследования в области температурных измерений.*— Сб.
2.2 ст./ Под ред. И. И. Киренкова.— Л. : Энергия, 1975.—
199 с.
263. 1.0; *Исследования в области температурных измерений.*— Тр.
2.2 метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 181.— 127 с.
264. 3.5; *Исследования в области тепловых и температурных изме-*
4.2 *рений. Диагностика плазмы и высокотемпературные изме-*
рения.— Сб. науч. тр. / Под ред. В. В. Кандыбы.— Л. :
Энергия, 1976.— 87 с.
265. 4.2 *Исследования при высоких температурах.*— Новосибирск :
Наука, 1966.— 124 с.
266. 1.0; *Исследования в области температурных измерений :* —
2.2 Сб. ст./ Под ред. И. И. Киренкова.— М. ; Л. : Изд-во
стандартов, 1972.— 202 с.
267. 3.5 *Кадышев А. Е. Измерение температуры пламени. Физи-*
ческие основы и методы.— М. : Металлургиздат, 1961.—
218 с.
268. 8.0 *Казаков А. Л. Сегнетоэлектрические кристаллы и их при-*
менение.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1976,
вып. 187, с. 3—9.
269. 9.0 *Камарали В. В. Фотоэлектропирометр для измерения*
градиентов температур при выращивании кристаллов
кремния.— ПТЭ, 1976, № 2, с. 218—219.
270. 1.1 *Кандыба В. В. Вопросы точности построения и передачи*
Международной практической температурной шкалы.—
Измер. техника, 1968, № 9, с. 34.
271. 2.2; *Кандыба В. В. Метрологическое обеспечение измерений*
1.1; *высоких температур.*— Измер. техника, 1975, № 10,
4.2 с. 10—11.
272. 1.0; *Кандыба В. В. Основные вопросы метрологического обес-*
3.5 *печения пирометрии плазмы.*— Тр. метрол. ин-тов СССР/
ВНИИМ, 1974, вып. 164, с. 6—11.
273. 4.2 *Кандыба В. В. Приборы для точного измерения высоких*
температур.— Измер. техника, 1956, № 1, с. 36.
274. 1.3; *Кандыба В. В., Ковалевский В. А. Прецизионная уста-*
9.2; *новка для градуировки ламп на яркостные и цветовые тем-*
9.3 *пературы.*— В кн.: *Исследования по жаропрочным спла-*
вам. М. : Изд-во АН СССР, 1957.— 371 с.
275. 1.1; *Кандыба В. В., Киренков И. И. Эталонные спектропиро-*
9.0 *метры.*— Измер. техника, 1970, № 8, с. 15.
276. 9.0 *Кандыба В. В., Ковалевский В. А. Фотоэлектрический*
спектропирометр высокой точности.— ДАН СССР, 1956,
108, № 4, с. 633.
277. 9.4; *Кандыба В. В., Пушкарёв Г. П., Гузей В. М. Государ-*
1.1 *ственный специальный эталон единицы температуры*

- плазмы в инфракрасной области спектра в диапазоне 1000—15 000 К.— Измер. техника, 1976, № 3, с. 40—41.
278. 4.1 Карелин П. К., Сычук В. И., Карпец В. П. и др. Прибор для контроля низких температур.— В кн.: Измерительные преобразователи, приборы и устройства. Омск: Изд-во ОПИ, 1974, вып. 2, с. 51—53.
 279. 10.7 Карпухин В. И., Николаенко В. А. Измерение температуры с помощью облученного алмаза.— М.: Атомиздат, 1911.— 71 с.
 280. 7.0 Кассациер Э. Л., Волченко А. Г. Многодиапазонный измеритель температуры.— Науч. тр. Ленингр. горн. ин-та, 1975, вып. 7, с. 71—74.
 281. 9.2 Катыс Г. П. Оптические датчики температуры.— М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959.— 111 с.
 282. 9.1 Каяндер М. С. Обеспечение единообразия измерений в радиационной пирометрии.— В кн.: Исследования в области температурных измерений: Тр. ВНИИМ, 1969, вып. 105, с. 135—145.
 283. 1.3; 9.4 Каяндер М. С. Установка для поверки инфракрасных пирометров суммарного излучения.— Там же, 1975, вып. 181, с. 40—42.
 284. 3.7 Ким В. А., Акбердин А. А. Установка для определения температуры начала и конца кристаллизации шлаков.— Завод. лаб., 1980, 46, № 5, с. 424—425.
 285. 9.0 Киренков И. Н. Влияние отраженного света на показания пирометров излучения.— В кн.: Исследования в области температурных измерений: Тр. ВНИИМ, 1969, вып. 105, с. 221—229.
 286. 1.3 Киренков И. Н. Еще раз об ошибках градуировки термометра.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 181, с. 42—45.
 287. 3.5; 4.2 Киренков И. Н. Измерение температур светящихся пламен.— В кн.: Исследования в области температурных измерений: Тр. ВНИИМ, 1950, вып. 9, с. 142.
 288. 1.1 Киренков И. Н. Комплекс эталонов для температурных измерений.— Измер. техника, 1967, № 11, с. 70.
 289. 9.3; 1.0 Киренков И. Н. Метрологические особенности цветовой пирометрии.— Там же, 1959, № 1, с. 28.
 290. 1.1 Киренков И. Н. Новые измерения термодинамической температуры золота и цинка.— Там же, 1960, № 6, с. 26.
 291. 9.0 Киренков И. Н. Особенности развития пирометрии излучения.— Там же, 1964, № 4, с. 42.
 292. 1.4 Киренков И. Н. Погрешность термометра от теплообмена.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 181, с. 74—76.
 293. 1.1 Киренков И. Н. Современные проблемы термодинамической температурной шкалы.— Там же, 1975, вып. 17, с. 3—6.
 294. 1.0 Киренков И. Н. Состояние температурной метрологии.— ПСУ, 1971, № 9, с. 11.
 295. 9.0 Киренков И. Н. Эффективная длина волны фотоэлектрического спектропирометра.— Измер. техника, 1973, № 6, с. 16.
 296. 1.1 Киренков И. Н., Ковалевский В. А., Крахмальникова Г. А. Воспроизведение шкалы яркостных температур фотоэлектрическим методом.— Там же, 1960, № 2, с. 18.

297. 9.0 *Киренков И. Н., Крахмальникова Г. А.* Спектропирометрическая установка ВНИИМ.— Там же, 1962, № 5, с. 18.
298. 9.0 *Киренков И. Н., Крахмальникова Г. А.* Точные фотоэлектрические пирометры.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1977, вып. 207, с. 27—40.
299. 6.0 *Кирсон Я. Э.* Прецизионные измерения дифференциальной термоэлектродвижущей силы полупроводников.— ПТЭ, 1975, № 1, с. 224—225.
300. 1.0 *Кисель А. Н., Финкельштейн В. Е., Сердюк И. Н.* Спектрокомпаратор ПСК-1 и его метрологическое исследование.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 183, с. 53—65.
301. 3.3 *Кислер С., Сичкарева В. А.* Малоинерционное измерение температуры электропроводниковых поверхностей.— В кн.: Применение гидравлических расчетов при решении инженерных задач. Тула: ТПИ, 1973, вып. 3, с. 142—145.
302. 3.6 *Киц А. И.* Датчики температуры для экструзионного оборудования.— ПСУ, 1976, № 6, с. 39—40.
303. 6.0 *Киц А. И., Бардыло А.-П. И., Бардыло В.-М. И. и др.* Увеличение надежности термоэлектрических термометров для специальных измерений температуры.— В кн.: Новые исследования в термометрии. Львов: Вища школа, 1974, с. 84—87.
304. 3.9 *Киц А. И., Кошельман В. Я., Саламаха В. А. и др.* Внезапные отказы датчиков температуры для ядерных реакторов.— Там же, с. 63—66.
305. 3.5; 6.0 *Киц И. И., Куляба И. Н., Соляных Л. М. и др.* Малоинерционная термopapa для измерения быстроменяющихся температур горячих газов.— КИТ, 1974, вып. 15, с. 79—81.
306. 1.3 5.0 *Клевцова Т. П., Райков Б. К., Скобелев О. П.* Способ линеаризации градуировочной характеристики платиновых терморезисторов.— ПСУ, 1978, № 4, с. 34—35.
307. 9.0 3.7 *Клименко А. В., Пильгун Н. Е.* Фотоэлектрический пирометр.— Там же, № 5, с. 35—36.
308. 2.2 *Клинский* термометровый завод: Изделия Клинского термометрового завода: Каталог.— М., 1960.— 110 с.
309. 4.2 6.0 *Князев О. А.* Универсальные удлинительные провода высокотемпературных термopap.— Измер. техника, 1979, № 3, с. 24—25.
310. 9.0 *Ковалевский В. А., Иосельсон Г. Л., Кандыба В. В.* Объективная спектропирометрическая установка СПК-1.— Там же, 1956, № 2, с. 16.
311. 9.3 *Ковалев А. П., Мысовский В. С.* Применение цветового пирометра ЦЭП-3 для контроля температуры жести.— Литейн. пр-во, 1966, № 10, с. 17—19.
312. 6.0 *Ковальский Р. В., Калинин Ю. А., Кубалов Б. В.* Экспериментальное определение характеристик термоэлектрических батарей.— Холодил. техника, 1973, № 10, с. 21—24.
313. 1.3 5.0 *Ковальчук Н. Г.* Об автоматизации поверки технических термометров сопротивления.— Измер. техника, 1977, № 6, с. 63.
314. 11.0 *Ковальчук Н. Г., Пытель И. Д., Тищенко Л. М.* Цифровой термометр.— Отбор и передача информ., 1978, № 55, с. 115—118.

315. 1.3 Коган А. В. Градуировка и поверка пирометров излучения для близкой инфракрасной области спектра по температурным лампам.— Измер. техника, 1976, № 4, с. 53—55.
316. 1.4; 9.2 Коган А. В. Зависимость точности измерений от качества изображения в яркостной пирометрии.— В кн.: Новые исследования в термометрии. Львов : Вища школа, 1974, с. 125—129.
317. 9.2 Коган А. В. О некоторых соотношениях между оптическими и метрологическими характеристиками при измерении температуры электронно-оптическими системами.— Отбор и передача информ., 1978, № 53, с. 81—85.
318. 9.2 Коган А. В., Лах В. И. Некоторые методы измерения истинной температуры яркостными пирометрами.— Электротермия, 1963, № 2, с. 27—29.
319. 9.2 Коган А. В., Лах В. И. Новый оптический микропирометр типа ОМП-019 для измерения температуры малых тел до 4000 °С.— ПСА, 1961, № 1, с. 10—11.
320. 9.1 Коган А. В., Лах В. И., Нечай Е. А. Низкотемпературный радиационный пирометр.— МАУ, 1968, № 1, с. 50—52.
321. 9.2 Коган А. В., Серафин А. И., Стадник Б. И. Новые оптические микропирометры для бесконтактного измерения температуры малых тел.— Приборостроение, 1966, № 1, с. 19—21.
322. 5.0; 6.0 Кожух В. Я. Автоматическое измерение разности температур.— М. : Энергия, 1969.— 87 с.
323. 1.1 Колесников А. А., Котюк А. Ф., Кузнецов В. И. и др. Высокотемпературная модель абсолютно черного тела.— В кн.: Вопросы метрологии и методы оптико-физических измерений. М. : Изд-во стандартов, 1975.— 69 с.
324. 1.1 Кондратьев Г. М. О международной шкале температур и задачах Консультативного комитета по термометрии.— Метрология и повероч. дело, 1939, № 6, с. 1.
325. 3.0; 2.0 Кондратьев Г. М. Тепловые измерения.— Л. : Машгиз, 1957.— 240 с.
326. 3.1 Коротков П. А., Лондон Г. Е. Динамические контактные измерения тепловых величин.— Л. : Машиностроение, 1974.— 224 с.
327. 1.4; 6.0 Костин А. К. Расчетно-экспериментальное исследование погрешностей измерения температуры теплоотдающей поверхности внешними термopарами.— Энергомашиностроение, 1976, № 3, с. 32—35.
328. 5.0 Костышин М. Т., Костко В. С. Тонкопленочные термометры сопротивления из индия для низких температур.— ПТЭ, 1981, № 4, с. 252.
329. 1.1 Котюк А. Ф., Ловинский Л. С., Самойлов Л. Н. и др. Прецизионное измерение термодинамической температуры абсолютно черного тела.— Измер. техника, 1975, № 1, с. 46—47.
330. 1.4 Кочан В. А. Преобразователь температуры с коррекцией погрешности.— В кн.: Тез. докл. Всесоюз. конф. по измерит. информ. системам «ИИС-73» (Ивано-Франковск, 11—14 сент. 1973 г.). Ивано-Франковск. Ин-т нефти и газа, 1973, ч. 2, с. 118—120.
331. 5.0 Кочан В. А., Веракшич О. О., Обелевская К. М. и др. Схема преобразователя температуры в электрический сигнал

- с линейной характеристикой.— Вісн. Льв. політехн. ін-ту, 1974, № 86, с. 109—112.
332. 1.4 *Кочан В. А., Заничковская Л. В.* О возможностях измерения разности температур с повышенной точностью.— Вестн. Льв. политехн. ин-та, 1981, № 154, с. 83—85.
333. 5.0; 4.2 *Кочан В. А., Лах В. И.* Низкоомные платиновые термометры сопротивления для измерения температуры до 1300 °С и вторичные приборы к ним.— ПСА, 1961, № 8, с. 20—22.
334. 1.7 *Кочан В. А., Обелевская К. М., Заничковская Л. В. и др.* Преобразователь температур с коррекцией погрешности нелинейности.— ПСУ, 1978, № 4, с. 35—36.
335. 1.4; 6.0 *Кочан В. А., Поздников Ю. В., Дейнека Н. А. и др.* Оптимизация параметров устройства для точной компенсации термоэ.д.с. свободных концов термоэлектрических термометров.— Изв. вузов. Приборостроение, 1978, вып. 21, № 7, с. 17—21.
336. 3.4 *Кошель В. П., Стадник Я. Ф., Стадник А. Я. и др.* Автоматические измерения температуры движущихся поверхностей.— МАП, 1980, № 12, с. 139.
337. 1.4; 5.0 *Кофман Л. Ю.* Инструментальные погрешности измерения флуктуаций температуры с помощью термометров сопротивления.— Метрология, 1977, № 11, с. 62—67.
338. 1.4; 3.2 *Кофман Л. Ю., Комаров В. П.* Автоматическая коррекция динамических характеристик термопреобразователей.— Метрология, 1976, № 8, с. 25—31.
339. 3.1 *Кофман Л. Ю., Райzman М. С., Эргард Н. Н.* Высокочувствительная малоинерционная аппаратура для измерения разности и двойной разности амплитуды пульсаций температуры.— ТВТ, 1975, вып. 13, № 3, с. 586—590.
340. 10.5 *Кравец Б. К., Огородник А. В., Прилепский В. Н. и др.* Пневматический измеритель температуры.— Автоматизация хим. пр-ва, 1975, вып. 10, с. 189—193.
341. 9.2 *Крамк Л. И., Юрьев М. И.* Дымчатые светофильтры для оптических пирометров.— Точная индустрия, 1935, № 9, с. 15.
342. 5.0 *Красников А. Р., Миронов-Копысов В. С., Муринец-Маркевич Б. Н.* Малоинерционный проволоочный термометр сопротивления для измерения мгновенных значений температуры газа в полостях ХГМ.— Вопр. гидродинамики и теплообмена в криоген. системах, 1973, вып. 3, с. 126—129.
343. 2.0 *Краус Н., Вошни Э.* Измерительные информационные системы.— М.: Мир, 1975.— 312 с.
344. 9.0 *Крахмальникова Г. А.* Исследование рассеянного света в фотоэлектрических спектропирометрах.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 171, с. 32—36.
345. 1.1 *Крахмальникова Г. А.* Построение температурной шкалы фотоэлектрическим методом в широком спектральном интервале.— Там же, 1963, вып. 71, с. 243.
346. 9.2 *Крейнес Д. Л.* Измерение температур 400—900 °С на макете оптического визуального пирометра повышенной точности.— Измер. техника, 1976, № 11, с. 65—66.
347. 9.0; 2.2 *Кременчуцкий Л. С.* Новые достижения в развитии пироприемников излучения.— В кн.: Тепловые приемники излучения. Л.: Изд-во Гос. опт. ин-та, 1974, с. 83—88.

348. 8.0 *Кременчуцкий Л. С.* Сегнетоэлектрические приемники излучения.— Киев : Наук. думка, 1971.— 234 с.
349. 7.0 *Кривоносов А. И.* Новые полупроводниковые датчики температуры.— ПСУ, 1971, № 9, с. 37—41.
350. 7.0 *Кривоносов А. И.* Полупроводниковые датчики температуры.— М.: Энергия, 1974.— 184 с.
351. 7.0 *Кривоносов А. И.* Термодиоды и термотриоды.— М.: Энергия, 1970.— 73 с.
352. 7.0 *Кривоносов А. И., Кауфман В. Я.* Расчет характеристик транзисторных преобразователей температуры.— ПСУ, 1973, № 12, с. 25—26.
353. 7.0 *Кривоносов А. И., Кувшинов В. З., Щербаков А. С.* Об одном из методов повышения точности устройств контроля температуры в одночувствительном элементе с $p-n$ -переходами.— Метрология, 1974, № 9, с. 41—46.
354. 6.0 *Кривцов В. А., Харитонов Н. П.* Микротермопары для точных измерений температуры.— Л. : ЛДНТП, 1966.— 40 с.
355. 9.4 *Крикунцов Л. З.* Справочник по основам инфракрасной техники.— М. : Сов. радио, 1978.— 400 с.
356. 1.4; 8.0 *Кришталь Б. В.* Влияние элементов измерительной схемы на погрешность преобразования температуры кварцевым преобразователем температуры.— КИТ, 1976, вып. 20, с. 67—72.
357. 8.0; 1.4 *Кришталь Б. В., Борис Я. В., Панчук С. А.* Измеритель разности температур.— В кн.: Новые исследования в термометрии. Львов : Вища школа, 1974, с. 98—101.
358. 8.0 *Кришталь Б. В., Борис Я. В., Панчук С. А. и др.* Кварцевые преобразователи температуры.— Там же, с. 132—137.
359. 3.6 *Крыжановский О. М., Музыкант А. М., Тищенко В. Г.* Бесконтактная система измерения температуры жидкого чугуна и оптимального регулирования дутья вагранки.— Литейн. пр-во, 1966, № 11, с. 18—19.
360. 1.3; 5.0 *Крытин Г. А.* Интерполяция градуировочных характеристик германиевых термометров сопротивления.— Тр. ВНИИФТРИ, 1975, вып. 21, с. 44—48.
361. 5.0 *Кудрин В. П.* Измерение температуры и разности температур в узком диапазоне.— Автоматизация и контрольно-измерит. приборы в нефтеперераб. и нефтехим. пром-сти, 1976, № 8, с. 10—11.
362. 3.3 *Кулаков М. В., Макаров Б. И.* Измерение температуры поверхности твердых тел.— 2-е изд., перераб. и доп.— М. : Энергия, 1979.— 96 с.
363. 5.0 *Кулиба И. Н., Крыжановский В. Н., Паляница И. Ф. и др.* Термометр сопротивления для измерения низких температур в присутствии сильных магнитных полей.— ПСУ, 1978, № 6, с. 39—40.
364. 9.0 *Кульбущ Г. П.* Электрические пирометры.— М.; Л.: Госэнергоиздат, 1932.— 408 с.
365. 6.0 *Куритный И. П.* Сходимость показаний термоэлектрических преобразователей ТПР-2075.— Измер. техника, 1979, № 5, с. 46—47.
366. 6.0; 3.6 *Куритный И. П., Саноцкий Я. В.* Термоэлектрические преобразователи ТПР-2075 и ТВР-2075 для измерения температуры расплавленной стали.— КИТ, 1979, вып. 25, с. 142—146.

367. 2.2 *Куритный И. П., Стадник Б. И.* Термоизмерения.— М.: Знание, 1979.— 64 с.
368. 6.0; 4.2 *Куритный И. П., Стадник Б. И., Лах В. И.* Влияние высокотемпературного нагрева на электрофизические свойства монокристаллического ниобия.— Физ.-хим. механика материалов, 1973, 9, № 1, с. 98—99.
369. 6.0 *Куритный И. П., Стадник Б. И., Лах В. И. и др.* Малоинерционный высокотемпературный термометр с повышенной сходимостью показаний.— ПТЭ, 1979, № 6, с. 191.
370. 1.1 *Кытик Г. А., Филенчик Р. В., Астров Д. Н. и др.* Международное сличение температурных шкал, воспроизводимых во ВНИИФТРИ в диапазоне от 1,5 до 30 К, с другими национальными шкалами.— Тр. ВНИИФТРИ, 1977, вып. 32/62, с. 6—15.
371. 6.0 *Лапп Г. Б., Попова Д. И.* Стабильность электродвижущей силы вольфрам-рениевых термопар.— В кн.: Рений. М.: Наука, 1964, с. 218—221.
372. 11.0; 5.0 *Латышев Л. Н., Мозговой А. Д., Ковшов В. Д.* Цифровой термометр сопротивления на базе ТСП.— Науч. темат. сб. Уфим. нефт. ин-та, 1976, вып. 35, с. 66—72.
373. 3.0 *Латышев Л. Н., Чеховский В. Я., Шевтаков Е. Н.* Определение истинной температуры веществ со сплошным спектром излучения.— Метрология, 1982, № 1, с. 35—41.
374. 6.0 *Лах В. И.* Изменение термометрических характеристик промышленных датчиков.— Там же, 1971, № 9, с. 25.
375. 1.4; 5.0; 6.0 *Лах В. И.* Основные принципы создания контактных средств термометрии широкого применения.— ЦСУ, 1983, № 3.
376. 5.0; 6.0 *Лах В. И., Борис Я. В., Димбровский Ю. П., Шарабура М. И.* Термопреобразователи сопротивления с унифицированным выходным сигналом 0—5 мА.— Там же, 1981, № 10, с. 19—20.
377. 4.2; 5.0 *Лах В. И., Дунец В. Б.* Исследование термометров сопротивления при высоких температурах.— КИТ, 1975, вып. 18, с. 116—121.
378. 5.0; 6.0 *Лах В. И., Журба И. Т., Киц А. И. и др.* Унифицированные термометры сопротивления и термопары широкого промышленного применения.— ПСУ, 1971, № 9, с. 20—23.
379. 5.0 *Лах В. И., Кочан В. А.* Перегрев платиновых сопротивлений измерительным током.— ТВТ, 1965, 1, № 4, с. 661—664.
380. 5.0; 4.2 *Лах В. И., Мартынюк С. С., Чернуха Ю. А.* Расчет метрологических характеристик преобразователей поточного типа.— КИТ, 1980, вып. 28, с. 18—22.
381. 7.0 *Лах В. И., Мышак Л. В.* Применение полупроводниковых анизотропных кристаллов для измерения температуры.— В кн.: Новые исследования в термометрии. Львов: Вища школа, 1974, с. 130—132.
382. 3.3; 3.4 *Лах В. И., Портак Р. А., Стадник Б. И.* Датчик для бесконтактного измерения температуры поверхности вращающихся цилиндров.— ПСУ, 1970, № 7, с. 39—42.
383. 1.3 *Лах В. И., Портак Р. А., Стадник Б. И.* Методы и средства градуировки поверхностных преобразователей.— Там же, 1969, вып. 10, с. 28—31.
384. 5.0; *Лах В. И., Процевят М. М., Паляница И. Ф. и др.* Пла-

- 4.1 тиновые термометры сопротивления для измерения низких температур.— ПСА, 1967, № 12, с. 23—26.
385. 9.0 *Лях В. И., Самченко Г. П.* Агрегатный комплекс стационарных пирометрических преобразователей и пирометров излучения АПИР-С.— ПСУ, 1980, № 6, с. 13—17.
386. 6.0 *Лях В. И., Стадник Б. И.* Термопары из сплава вольфрама с рением.— ПСА, 1961, № 8, с. 16—18.
387. 6.0 *Лях В. И., Стадник Б. И., Кузьма Ю. Б.* Термоэлектрическая стабильность термопар из некоторых вольфрам-рениевых сплавов при высоких температурах.— ТВТ, 1963, 1, № 2, с. 299—305.
388. 2.2 *Лях В. И., Стадник Б. И., Кюздени О. А.* Приборы для измерения температуры контактным методом.— М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1969.— 53 с.
389. 6.0 *Лях В. И., Хохлова Л. С.* О международной стандартизации термоэлектрических преобразователей.— Стандарты и качество, 1981, № 12, с. 27—30.
390. 6.0 *Лях В. И., Хохлова Л. С.* Стандартизация термопреобразователей сопротивления.— Стандарты и качество, 1982, № 6, с. 44—45.
391. 3.5; 6.0 *Лебедев Д. П., Андреев Е. Ф.* Измерение температуры потока разреженного газа многокорольковой термопарой.— Изв. вузов. Приборостроение, 1973, вып. 16, № 11, с. 119—123.
392. 6.0; 4.2; 3.9 *Леви Г. Ф., Фауз Р. Р., Шервин Р.* Работа термопар при высоких температурах и наличии ядерного излучения.— В кн.: Измерения температур в объектах новой техники. М.: Мир, 1965, с. 37—44.
393. 2.1 *Леонтьев К. А.* Температура и ее измерение.— 2-е изд.— М.: ГИЗ, 1922.— 64 с.
394. 2.1 *Линевег Ф.* Измерение температур в технике.— Справ. изд. / Пер. с нем.— М.: Металлургия, 1980.— 544 с.
395. 2.2 *Логвиненко С. П.* Измеритель — регулятор температур.— ПТЭ, 1976, № 3, с. 279.
396. 4.1; 7.0 *Логвиненко С. П., Дербышева С. Л.* Аппроксимация в интервале 4,2—100 К характеристик технических термометров сопротивления GaAs р-типа.— Криоген. и вакуум. техника, 1974, вып. 4, с. 65—67.
397. 1.3; 4.1 *Логвиненко С. П., Еременко В. И., Сухих В. Д. и др.* Установка для исследования и градуировки термометров сопротивления, термодиодов и термопар в интервале температур 4,2—300 К.— Измер. техника, 1977, № 3, с. 71—72.
398. 4.1; 7.0 *Логвиненко С. П., Россошанский О. А.* Низкотемпературные термодиоды из GaAs, легированного Zn.— ПТЭ, 1975, № 2, с. 219—220.
399. 4.1; 7.0 *Логвиненко С. П., Россошанский А. О., Поладич В. В.* Термометр из GaAs для интервала 1—100 К.— Там же, 1974, № 4, с. 203—205.
400. 9.2 *Лозунов А. В., Ковалев А. И.* Повышение точности измерения температур оптическими пирометрами с исчезающей нитью.— Измер. техника, 1973, № 11, с. 43—44.
401. 1.4 *Лондон Г. Е.* Графоаналитический метод определения значений параметров корректирующих устройств.— Там же, 1974, № 11, с. 54—56.
402. 1.4; *Лоспо К., Метте Г.* Погрешность термопар при измере-

- 6.0 нии температуры в магнитных полях.— В кн.: Измерения температур в объектах новой техники. М.: Мир, 1965, с. 29—36.
403. 9.0 *Лукошков В. В., Коновалов В. А.* Приборы для бесконтактного измерения температуры ПИТ-1.— Тр. ЦНИИ мех. обраб. древесины, 1974, вып. 31, с. 76—77.
404. 10.1 *Луцки Я. Т.* Акустические преобразователи температуры с резонаторами из тугоплавких металлов.— КИТ, 1979, вып. 25, с. 126—129.
405. 1.4; 3.4 *Луцаев Г. А., Ушаков В. Г., Фандеев Е. И.* Погрешности контактных непогружаемых термодатчиков при контроле температуры движущихся поверхностей.— Изв. Сев.-Кавк. науч. центра высш. шк. Сер. техн. наук, 1977, № 4, с. 50—52.
406. 3.9 *Лысиков Б. В., Прозоров В. К.* Температурные измерения в ядерных реакторах.— М.: Атомиздат, 1975.— 180 с.
407. 10.9 *Магда И. Н.* Дилатоконденсаторный термометр.— Изв. вузов. Приборостроение, 1975, вып. 18, № 1, с. 123—125.
408. 10.9; 4.2 *Магда И. Н., Гривенко А. П.* Дилатоконденсаторный датчик повышения температуры.— Изв. вузов. Приборостроение, 1974, вып. 17, № 2, с. 106—109.
409. 1.4; 9.0 *Маждей П. Л., Лысаков И. И.* Поправки к локальным значениям температуры факела, измеренным отсосными пирометрами.— Изв. вузов. Энергетика, 1974, № 6, с. 51—56.
410. 1.3 *Макаров В. П., Ткачев Н. И.* Система автоматического управления установкой для градуировки датчиков температуры и скорости.— В кн.: Теплопроводность и конвективный теплообмен. Киев: Наук. думка, 1977, с. 115—117.
411. 1.4; 6.0 *Максимова В. Л.* Метод повышения надежности и точности измерения температуры черных металлов термопарами погружения.— Измер. техника, 1976, № 11, с. 66.
412. 6.0 *Мальбин М. Г.* Пленочная термопара железо-никель.— ПТЭ, 1976, № 2, с. 221—222.
413. 10.4 *Манченко А. В., Колодий З. А., Столярчук П. Г.* Шумовой термометр с компенсацией собственных шумов.— Измер. техника, 1982, № 3, с. 48—49.
414. 6.0; 6.2 *Маргулис О. М., Стадник Б. И., Усатилов И. Ф. и др.* Огнеупорная изоляция термоэлектродов для измерения высоких температур.— Там же, 1963, № 6, с. 32—35.
415. 6.0; 3.9 *Маркина Н. В., Самсонов Б. В., Цыконов В. А.* Влияние реакторных излучений высокой интенсивности на показания термопар.— В кн.: Дозиметрия и радиационные процессы в дозиметрических системах. Ташкент: Фан, 1972, с. 128—133.
416. 2.2; 9.0 *Маслов В. С.* Измерительные преобразователи для агрегатированного комплекса пирометров.— В кн.: Измерение, контроль и автоматизация. Киев: Техніка, 1974, с. 72—77.
417. 1.4 *Маслов Л. Е.* Теоретическое исследование погрешностей измерения температур.— В кн.: Автоматизация химической промышленности. М.: Машиностроение, 1973, с. 68—70.
418. 1.1 *Международная практическая температурная шкала 1968 г. (МПТШ-68).*— М.: Изд-во стандартов, 1976.— 27 с.

419. 9.4 *Менгарт Ю. К.* Инфракрасный пирометр для полупрозрачных материалов.— ПСУ, 1979, № 5, с. 26—27.
420. 4.1 *Мендельсон К.* Физика низких температур.— М.: Изд-во иностр. лит., 1962.— 221 с.
421. 3.5; 6.0 *Меньшиков В. И.* Способ измерения температуры газовых потоков двумя термопарами.— ИФЖ, 1976, вып. 31, № 5, с. 794—799.
422. 1.1 *Методика* внедрения государственного первичного эталона единицы температуры — Кельвина (в части градуировки средств измерений температуры) МИ-1-74.— М.: Изд-во стандартов, 1974.— 7 с.
423. 2.1 *Методы* измерения температуры: Сб. ст./Под ред. В. А. Соколова. В 2-х ч.— М.: Изд-во иностр. лит., 1954.— Ч. 1—2.
424. 2.1 *Мигунов В. Г.* К вопросу определения и измерения температуры.— Тр. Ташк. политехн. ин-та, 1973, вып. 101, с. 271—291.
425. 1.3; 6.0 *Мильченко В. Ю., Кочан В. А.* Структурный метод повышения точности автоматической проверки термоэлектрических термометров.— Измер. техника, 1978, № 2, с. 58—59.
426. 1.3; 6.0 *Мильченко В. Ю., Кочан В. А., Саченко А. А. и др.* Цифровой измеритель температуры с автоматической коррекцией погрешности термоэлектрического термометра.— Там же, 1979, № 5, с. 48—49.
427. 1.3; 6.0 *Мильченко В. Ю., Лебедев Г. И.* Автоматическая установка для проверки термоэлектрических термометров из благородных металлов.— Измер. техника, 1976, № 4, с. 34—36.
428. 1.3; 6.0 *Мильченко В. Ю., Лебедев Г. И.* Полуавтоматическая установка с программным управлением для проверки термоэлектрических термометров.— Там же, № 2, с. 84—86.
429. 2.1 *Минералогическая* термометрия и бирометрия.— М.: Наука, 1965.— 328 с.
430. 5.0 *Минкин С. Б., Шашков А. Г.* Позисторы.— М.: Энергия, 1973.— 89 с. (Б-ка по автоматике).
431. 4.2; 6.0 *Митюшов В. А., Тимофеев П. И., Карболин В. М.* Термопары, предназначенные для высокотемпературных измерений.— Благород. металлы и их применение, 1971, вып. 28, с. 254—260.
432. 2.1 *Михеев М. А., Михеева М. М.* Основы теплопередачи.— М.: Энергия, 1977.— 343 с.
433. 6.0; 3.4 *Молодых Н. И., Санов Н. Н., Ханаяев В. М.* Экспериментальный ртутный токосъемник для снятия термоэ.д.с. с вращающихся термопар.— Приборостроение, 1975, вып. 18, с. 99—101.
434. 9.1 *Мрыкин С. Д., Захаров Ю. Н., Дейников И. И.* Высокочувствительный термометр суммарного излучения с пироэлектрическим приемником.— В кн.: Сегнето- и пьезоматериалы и их применение. М.: МДНТП, 1978, с. 72—75.
435. 3.5 *Надточий А. А.* Измерение распределения температуры в плазме методами голографии.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 183, с. 74—81.
436. 3.5 *Надточий А. А.* Измерение пространственного распределения температуры плазмы по ее радиоизображению.—

Тр. метрол. ин-тов СССР / Харьк. НИИМ, 1973, вып. 10, с. 136—145.

437. 3.5 *Надточий А. А., Иванова Е. П.* Применение интерферометра для исследования спектров излучения плазмы в микроволновом диапазоне.— Там же, с. 194—198.
438. 7.0 *Наконечный В. В., Веденин А. Н.* Термисторный снаряд для измерения температуры горных пород.— Науч. тр. Ленингр. горн. ин-та, 1973, вып. 6, с. 117—120.
439. 1.4; 6.0 *Наумов Ю. Н., Мацык С. В.* Корректор динамической погрешности термопар.— Измер. техника, 1977, № 7, с. 56—57.
440. 9.3 *Негруцак В. Т.* Новые пирометры спектрального отношения.— ПСУ, 1975, № 11, с. 37—38.
441. 5.0 *Непомнящий С. И.* Взаимозаменяемость платиновых термометров сопротивления.— Тр. НИИ гидрометеорол. приборостроения, 1975, вып. 32, с. 39—45.
442. 10.2 *Непомнящий С. И.* Датчики температуры воздуха.— Там же, 1973, вып. 29, с. 14—19; 1973, вып. 30, с. 17—21.
443. 8.0 *Непомнящий С. И.* Кварцевые датчики температуры и результаты их исследования.— Там же, 1978, вып. 35, с. 114—118.
444. 1.4 *Непомнящий С. И.* Некоторые данные об определении погрешности измерения температуры в реальных условиях.— Там же, 1974, вып. 31, с. 19—25.
445. 5.5; 1.4 *Непомнящий С. И.* О линеаризации характеристики платиновых термометров сопротивления.— Там же, 1976, вып. 33, с. 66—69.
446. 1.4; 10.2 *Непомнящий С. И.* Погрешности датчиков температуры воздуха.— Там же, 1973, вып. 29, с. 57—61.
447. 4.2 *Ниженский А. Д.* Устройство для измерения температуры.— В кн.: Преобразовательная и электронизмерительная техника. Киев.: Наук. думка, 1975, с. 46—51.
448. 7.0 *Новинский Н. А.* Кварцевый термометр с генератором на полевых транзисторах.— ПТЭ, 1977, № 3, с. 255—256.
449. 2.0 *Новицкий П. В.* Основы информационной теории измерительных устройств.— Л.: Энергия, 1968.— 248 с.
450. 1.0 *Новые научно-исследовательские работы по метрологии.*— М.; Л.: Изд-во стандартов, 1964.— 40 с.— (Информ. ст. /ВНИИМ; № 3).
451. 5.0; 4.2 *Обелевская Н. М., Заничковская Л. В., Кочан В. А.* Низкотемпературные термометры сопротивления для измерения высоких температур.— В кн.: Современные методы и приборы автоматического контроля и регулирования технологических процессов. М.: МДНТП, 1976, с. 77—80.
452. 11.0; 6.0 *Обозовский Б. С., Обозовский С. С., Ткаченко С. С.* Цифровой милливольтметр для измерений температуры термоэлектрическим методом.— В кн.: Приборы для исследования физических свойств материалов. Киев: Наук. думка, 1974, с. 128—131.
453. 9.0 *Объективные методы пирометрии излучения металлов/Ин-т металлургии АН СССР.*— М.: Наука, 1976.— 192 с.
454. 10.4; 10.8 *Олейник Б. Н.* Использование шумового и квадрупольного ядерного термометров в термометрии.— Измер. техника, 1972, № 3, с. 46—47.

455. 1.0; *Олейник Б. Н.* Стандартизация в термометрии.— Там же, 12.0 1975, № 9, с. 51—53.
456. 1.1 *Олейник Б. Н., Израилов К. С.* Особенности проблемы воспроизведения и передачи размера единицы температуры — Кельвина.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1979, вып. 237/297, с. 52—76.
457. 2.2; *Олейник Б. Н., Кандыба В. В.* Международное единство 1.0 в области температурных измерений.— Там же, 1975, № 4, с. 30—32.
458. 1.4; *Олейникова Л. Д.* Погрешность градуировки высокотемпературных термопар.— Там же, 1974, № 11, с. 56—57.
459. 3.5; *Оптическая пирометрия плазмы*: Сб. ст. /Пер. с англ. 9.2 под ред. Н. Н. Соболева.— М.: Изд-во иностр. лит., 1960.— 438 с.
460. 9.2 *Оптические методы измерения температур в металлургии.* Теория, системы, элементы: Сб. ст./Отв. ред. Д. Я. Свет.— М.: Наука, 1979.— 162 с.
461. 9.2 *Оптический пирометр ЛОП-72.*— Измер. техника, 1974, № 9, с. 27
462. 4.1 *Орлова М. П.* Низкотемпературная термометрия.— М.: Изд-во стандартов, 1975.— 160 с.
463. 4.1; *Орлова М. П.* Развитие научно-исследовательских работ 2.1 в СССР и зарубежных странах в области измерения низких температур.— Измер. техника, 1964, № 6, с. 22—31.
464. 1.1; *Орлова М. П., Астров Д. Н., Филончик Р. В.* Воспроизведение практических температурных шкал в диапазоне 1,5—13,81 К.— Тр. ВНИИФТРИ, 1975, вып. 21, с. 19—27.
465. 2.2 *Орнатский П. П.* Автоматические измерения и приборы.— Киев: Вища школа, 1973.— 552 с.
466. 5.0 *Оришанский Д. Б.* Новые термопары сопротивления промышленного назначения.— В кн.: Новые теплоэнергетические приборы и регуляторы. Л.: Машгиз, 1953, вып. 1, с. 58—93.
467. 6.0 *Ослопов О. И., Иванов С. А., Дордик З. И.* Применение термоэлектродного провода ХА в качестве компенсационного к термопаре ПП-4.— Измер. техника, 1976, № 11, с. 69.
468. 2.1 *Основные понятия и современные методы измерений температур*: В 3-х т.— М.: Металлургия, 1967.— Т. 3. Ч. 1. 424 с.
469. 1.3 *Ошарина Л. И.* Влияние внешних условий на градуировочные характеристики температурных ламп.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 181, с. 23—24.
470. 9.0; *Ошарина Л. И.* О новых излучателях для точной пирометрии.— Там же, вып. 171, с. 43—47.
471. 6.0 *Павлов Б. П., Лыжевская Л. И., Константинова Г. И. и др.* Экспериментальные данные исследования неоднородности различных термоэлектродных материалов.— Измер. техника, 1976, № 5, с. 48—49.
472. 10.3 *Павлов В. А.* Мост взаимоиндукционности для точной магнитной термометрии.— ПТЭ, 1975, № 1, с. 245—247.
473. 1.1 *Павлов В. А., Шкраба В. Т., Филончик Р. В., Астров Д. Н.* Исследование отклонений МПТШ-68 от термодинамической шкалы в области водородных температур магнитным методом.— Измер. техника, 1975, № 7, с. 57—60.
474. 3.8 *Павлухин О. И.* Бесконтактные датчики для контроля тем-

- пературы труднодоступных участков поверхности тел и труб мелкого сортамента.— Пр-во труб, 1975, № 1, с. 418—420.
475. 3.3 Пак В. Новые контактные методы измерения температуры поверхности твердых тел со следящей компенсацией теплоотвода : Обзор.— М. : ВНИИКИ, 1972.— 114 с.
476. 3.3 Пак В., Кринский Ю. П. Измерения температуры поверхности твердых тел.— ПСУ, 1978, № 7, с. 23—24.
477. 1.3; 6.0 Паляница И. Ф. Способ коррекции градуировочных характеристик термоэлектрических преобразователей.— КИТ, 1979, вып. 25, с. 117—120.
478. 1.1 Паляница И. Ф., Стадник Б. И., Кюздени О. А. и др. Современное состояние измерений низких температур.— ПСУ, 1971, № 9, с. 14—16.
479. 7.0 Панкратов Н. А., Коротков В. П. Полупроводниковые глубокоохлаждаемые болометры.— Оптико-мех. пром-сть, 1974, № 2, с. 47—63.
480. 3.4 Панфиненко А. Н., Богаенко И. Н. Бесконтактное измерение температуры движущейся поверхности с помощью газовой струи.— В кн.: Средства автоматизации, передачи и обработки информации. Киев : Техніка, 1974, с. 7—13.
481. 2.1 Паперный Е. А., Эйдельштейн И. Л., Красицкий М. С. Правильное измерение температуры.— Калининград: Кн. изд-во, 1964.— 140 с.
482. 1.4 Паперный Е. А., Эйдельштейн И. Л. Погрешности контактных методов измерения температур.— М. ; Л. : Энергия, 1966.— 95 с.
483. 4.2; 9.2 Пасутман Б. В. Повышение точности измерений малых разностей высоких температур на оптическом пирометре методом фотографии.— Завод. лаб., 1979, 45, № 4, с. 354—356.
484. 2.2 Певзнер В. В. Прецизионные регуляторы температуры.— М. : Энергия, 1973.— 192 с.
485. 3.5 Певзнер М. И., Белоглазов Н. К. Измерение температуры газовых потоков с помощью термоэлектрических пирометров.— В кн.: 2-я Всесоюз. конф. по методам аэрофиз. исслед. (Новосибирск, 1979 г.). Новосибирск : Новосиб. ин-т теорет. и прикл. механики, 1979, с. 86—88.
486. 9.0 Певзнер М. И., Иссерлин А. С. Пирометр для точных измерений температуры незапыленных потоков.— В кн.: Лучистый теплообмен. Калининград : Изд-во Калинингр. ун-та, 1974, с. 183—189.
487. 2.2 Перечень приборов для измерения, регулирования, контроля и сигнализации температуры.— Л., 1970.— 248 с. (Мин-во цв. металлургии СССР).
488. 9.0; 3.5 Петашивили О. М., Идиатулин З. Г. Пирометр для измерения температуры запыленных потоков.— Пром. энергетика, 1978, № 62, с. 23—25.
489. 10.5 Петров А. И. Глубинные термометры агрегатного комплекса.— Нефтяник, 1977, № 2, с. 7—9.
490. 9.0 Петров В. А. Излучательная способность высокотемпературных материалов.— М. : Наука, 1969.— 80 с.
491. 2.2; 3.5 Петунин А. Н. Измерение параметров газового потока. (Приборы для измерения давления, температуры и скорости).— М. : Машиностроение, 1974.— 260 с.
492. 3.5 Петунин А. Н. Методы и техника измерений парамет-

- ров газового потока.— М. : Машиностроение, 1972.— 332 с.
493. 9.1 Пикашов В. С., Еринов А. Е., Геращенко О. А. Радиационные пирометры с диафрагменной оптикой для контроля параметров переноса энергии излучением.— В кн.: Лучистый теплообмен. Калининград: Изд-во Калинингр. ун-та, 1974, с. 134—147
494. 9.1 Пилат И. М., Ащеулов А. А., Цыпко Н. К. Радиационный пирометр на анизотропных термоэлементах.— Оптико-мех. пром-сть, 1974, № 5, с. 34—36.
495. 6.0 Пилат И. М., Ветошников В. С., Хохлачев К. И. Термоэлектрический приемник излучения на анизотропных термоэлементах.— В кн.: Тепловые приемники излучения. Л. : Гос. опт. ин-т, 1974, с.3—7.
496. 1.1; 6.0 Пилипчук Б. И. Ошибки эталонирования платинового термометра.— В кн.: Исследования в области термометрии: Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1948, вып. 4, с. 111.
497. 1.3 Пилипчук Ю. Л., Зарицкий Д. П., Товма А. А. и др. Устройство для градуировки термометров в интервале 78—350 К.— Измер. техника, 1980, № 8, с. 44—45.
498. 5.0; 4.2 Плащинский Н. Т., Шефтель И. Т. Новые высокотемпературные терморезисторы.— ПСУ, 1971, № 9, с.36—37.
499. 6.0 Плетенецкий Г. Е. Градуировочная характеристика вольфрам-молибденовой термопары.— ПТЭ, 1971, № 2, с. 251.
500. 5.0 Повх И. Л. и др. Методика повышения быстродействия контактных термометров сопротивления.— Метрология, 1975, № 10, с. 47—52.
501. 1.1; 4.1 Погорелова О. Ф. Новые реперные точки в низкотемпературной термометрии.— Измер. техника, 1976, № 11, с. 58—60.
502. 2.0 Полежаев Ю. В., Юревич Ф. Б. Тепловая защита.— М. : Энергия, 1976.— 392 с.
503. 9.0 Поляков И. П., Тюкаев В. И. Фотоэлектрический пирометр для измерения высоких температур конденсированных сред.— В кн.: Тепло- и массоперенос и теплофизические свойства веществ. Минск : ИТМО, 1974, с. 162—168.
504. 1.4 Попов В. Н. Об искажении температурного поля в области заделки пары.— ТВТ, 1966, 4, № 2, с. 112.
505. 2.1 Попов М. М. Термометрия и калориметрия.— 2-е изд., полностью перераб.— М. : Изд-во Моск. ун-та, 1954.— 943 с.
506. 1.3; 3.4 Портак Р. А. Установка для исследования и поверки преобразователей температуры поверхности вращающихся объектов.— Измер. техника, 1976, № 11, с. 60—62.
507. 1.4; 3.4 Портак Р. А., Лах В. И., Полищук Е. С. Вопросы повышения точности измерения температуры рабочих поверхностей вращающихся объектов.— В кн.: Новые исследования в термометрии. Львов : Вища школа, 1974, с. 142—147.
508. 3.4 Портак Р. А., Фединец В. А., Кизливский Г. И. Измерение температуры вращающихся валков.— Механизация и автоматизация пр-ва, 1978, № 7, с. 19—21.
509. 2.2 Поскачей А. А., Русин С. П. Измерение температуры в электротермических установках.— М. : Энергия, 1967.— 112 с.

510. 9.0 *Посклячей А. А., Чарихов Л. В.* Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью.— М.: Металлургия, 1978.— 199 с.
511. 9.2 *Поскачей А. А., Чубаров Е. П.* Оптико-электронные системы измерения температуры.— М.: Энергия, 1979.— 208 с.
512. 6.0; 3.9 *Правдюк Н. Ф., Иванов А. Н., Дубровин К. П.* Влияние реакторного облучения на термопарные материалы.— Атом. энергия, 1968, 25, вып. 3, с. 233—235.
513. 2.2 *Преображенский В. П.* Теплотехнические измерения и приборы.— М.: Энергия, 1978.— 704 с.
514. 1.4 *Преображенский В. П., Лецкас В. Г.* Исследование методических погрешностей при измерении температур контактными методами на ТЭС.— Тр. МЭИ, 1974, вып. 188, с. 65—69.
515. 1.4; 6.0 *Преображенский В. П., Панько М. А., Стригина Л. А. и др.* Метрологические характеристики хромель-алюмелевых и хромель-копелевых термопар.— Там же, 1975, вып. 212, с. 132—136.
516. 2.2 *Приборы для измерения и регулирования температуры: Номенклатурный справочник.*— М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1977.— 60 с.
517. 3.0; 6.0 *Приймак С. В., Федик И. И.* Измерение температуры в условиях ядерных излучений.— Атом. энергия, 1981, 51, № 3, с. 158—161.
518. 5.0 *Прохоренко В. Я., Гапчин Б. М., Стаднык Б. И. и др.* Исследование конструкционных материалов для жидкометаллического термометра сопротивления.— В кн.: Новые исследования в термометрии. Львов: Вища школа, 1974, с. 33—36.
519. 1.4; 4.1; 5.0 *Процевят М. М.* Анализ погрешностей приведения при градуировке технических низкотемпературных платиновых термопреобразователей сопротивления в интервале температур 13...90 К.— КИТ, 1978, вып. 23, с. 48—54.
520. 4.1; 5.0 *Процевят М. М.* О стабильности низкотемпературных платиновых термометров сопротивления.— Там же, 1977, вып. 21, с. 139—142.
521. 1.4; 5.0; 4.1 *Процевят М. М., Бардыло В.-М. И., Паляныця И. Ф. и др.* Погрешности приведения платиновых термометров сопротивления при измерении низких температур.— В кн.: Новые исследования в термометрии. Львов: Вища школа, 1974, с. 27—29.
522. 1.4; 3.2 *Процевят М. М., Семерак М. М., Процюк Б. В. и др.* Определение и анализ динамических погрешностей термопреобразователей сопротивления при низкотемпературных измерениях.— КИТ, 1979, вып. 25, с. 13—19.
523. 3.2 *Пугачев В. С.* Теория случайных функций.— М.: Физматгиз, 1962.— 883 с.
524. 9.4 *Пустовойт Г. В., Лопатенко В. Е., Аканович В. А.* Об измерении температуры в зоне резания по ИК-излучению.— Синтет. алмазы, 1977, № 6, с. 23—27.
525. 9.0 *Пустогаров А. В.* Универсальный микропирометр.— ПТЭ, 1976, № 3, с. 239—242.
526. 4.2 *Пустогаров А. В., Завидей В. И., Захаркин Р. Я. и др.* Измерение температуры электродов плазмотрона.— Изв. вузов. Техн. науки, 1978, № 8/2, с. 51—61.

527. 1.1; *Пушкарев Г. П.* Построение температурной шкалы в области плазменных температур.— Измер. техника, 1974, № 11, с. 49—50.
528. 5.0 *Пыж А. Д.* Унификация температурных характеристик металлических термопреобразователей сопротивления.— ПСУ, 1978, № 4, с. 33—34.
529. 9.1 *Разумовский И. Т.* Анализ характеристик радиационных термометров.— Тр. ЛИТМО, 1973, вып. 73, с. 3—11.
530. 1.0 *Райzman М. С.* Совещание «Метрологическое обеспечение измерений нестационарных температур» (Львов, 25—27 июня 1975 г.).— ТВТ, 1976, 14, № 2, с. 434—435.
531. 5.0 *Райzman М. С., Андреева Л. А.* Герметичный никелевый термометр сопротивления для измерения быстроменяющихся температур водной среды в диапазоне —4: +40 °С.— ТВТ, 1975, 13, № 2, с. 457—458.
532. 1.4; 3.1 *Райzman М. С., Эргардт Н. Н.* О динамических погрешностях измерения пульсаций температур двумя термодатчиками.— Метрология, 1974, № 10, с. 60—64.
533. 1.4 *Ратновский В. Я., Кожевников Е. С.* Уменьшение погрешностей измерения температуры вращающихся деталей терморезистором с устройством емкостной связи.— Изв. вузов. Приборостроение, 1981, вып. 24, № 2, с. 8—13.
534. 4.1; 2.1 *Рауэ И. А.* Техника низкотемпературного эксперимента.— М.: Мир, 1966.— 286 с.
535. 6.0 *Редько Ю. Ф., Остапчук В. И.* Портативный измеритель температуры.— Хим. и нефт. машиностроение, 1975, № 7, с. 46.
536. 9.1; 3.3 *Ремняков В. З.* Измерение температуры поверхности движущихся слитков импульсным радиационным пирометром.— Металлург. теплотехника, 1974, № 2, с. 69—73.
537. 3.5 *Репик Е. У., Соседко Ю. П.* Термодатчик для измерения температуры сверхзвукового газового потока малой плотности.— ТВТ, 1979, 17, № 3, с. 592—597.
538. 9.2 *Рибо Г.* Оптическая пирометрия.— М.; Л.: Гостехтеориздат, 1934.— 455 с.
539. 2.1 *Ристо В. А., Пушкарев Г. П.* О возможности применения «аргонового термометра».— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1974, вып. 164, с. 25—31.
540. 6.0; 1.4 *Рогельберг И. Л., Пучков Б. И.* Термоэлектрическая стабильность термопарных кабелей.— В кн.: Исследование сплавов для термопар, М.: Металлургия, 1971, с. 70—73.
541. 9.0 *Рождественский А. В.* О некоторых возможностях многоспектральной пирометрии.— Метрология, 1976, № 6, с. 45—48.
542. 9.0 *Рождественский А. В.* Определение порога чувствительности многоспектрального пирометра.— Там же, 1978, № 9, с. 34—39.
543. 1.4; 9.2 *Рождественский А. В.* Сравнение методических погрешностей яркостного и цветового методов измерения температуры.— Изв. вузов. Приборостроение, 1976, вып. 19, № 8, с. 107—109.
544. 2.1 *Розенберг Ф.* История физики: В 2-х ч./ Пер. с нем. Ч. I. История физики в древности и средние века.— М.; Л.: ОНТИ, 1937.— 127 с.

545. 2.1 Розенберг Ф. История физики: В 2-х ч./Пер. с нем. Ч. II. История физики в новое время.— М.; Л.: ОНТИ, 1937.— 311 с.
546. 9.3 Роскошный В. Г. Выбор приемника для автоматического фотоэлектрического спектропирометра.— Автоматизация и механизация процессов литья, 1973, вып. 5, с. 68—71.
547. 4.2 Роскошный В. Г. Устройство для измерения температуры высокотемпературных газоразрядных источников нагрева.— ПТЭ, 1973, № 6, с. 145—147.
548. 1.3; 9.3 Росскова Н. В. Применимость вольфрамовых и танталовых излучателей для градуировки пирометров спектрального отношения в ближайшей инфракрасной области спектра.— Изв. ЛЭТИ, 1974, вып. 142, с. 98—102.
549. 9.0; 3.7 Рудная А. И., Гайдученко Н. И., Комарова В. И. Измерение температуры металла и выхлопных газов с помощью фотоэлектрического пирометра в конверторе.— Сталь, 1967, № 5, с. 445—447.
550. 6.0 Рудничкий А. А. Термоэлектрические свойства благородных металлов и их сплавов.— М.: Изд-во АН СССР, 1956.— 147 с.
551. 6.0 Рудничкий А. А., Тюрин И. И. Исследование и выбор сплавов для высокотемпературных термопар.— ЖПХ, 1956, вып. 1, № 5, с. 1074—1090.
552. 1.3 Рыжов Э. В. Исследование способов тарирования естественных термопар.— Станки и инструмент, 1975, № 1, с. 31.
553. 3.6 Рэзер С. Термометр периодического погружения.— В кн.: Измерение нестационарных температур и тепловых потоков. М.: Мир, 1966, с. 92—100.
554. 7.0 Саватеев А. В., Бариненков Ю. Д. О возможности использования шума полупроводниковых сопротивлений с целью измерения их собственной температуры.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 171, с. 54—60.
555. 10.8 Саватеев А. В., Воробьев И. В. Об оптимизации спектрометра для прецизионных измерений температуры методом ЯКР.— ПСУ, 1979, № 8, с. 19—21.
556. 9.1 Савицкий А. А. Радиотелеметрический температурный датчик с частотным выходом.— В кн.: Физика неразрушающего контроля. Минск: Отд. физики неразрушающего контроля АН БССР, 1974, с. 147—151.
557. 6.0 Савицкий Е. М., Куритный И. П., Стадник Б. И. Термоэлектрические свойства монокристаллического вольфрама.— КИТ, 1973, вып. 14, с. 40—43.
558. 6.0 Савицкий Е. М., Куритный И. П., Стадник Б. И. Термоэлектрические свойства монокристаллического молибдена.— В кн.: Структура и свойства монокристаллов тугоплавких металлов. М.: Наука, 1973, с. 233—241.
559. 6.0 Савицкий Е. М., Стадник Б. И., Куритный И. П. Вольфрам-рениевые сплавы в термометрии.— В кн.: Сплавы редких металлов с особыми физическими свойствами. М.: Наука, 1975, с. 18—193.
560. 6.0; 4.2 Савицкий Е. М., Стадник Б. И., Куритный И. П. и др. Стабильность электрофизических свойств монокристаллов ниобия при высоких температурах.— В кн.: Структура и свойства монокристаллов тугоплавких металлов. М.: Наука, 1973, с. 241—247.

561. 1.4; 5.0 *Савченко А. А., Кочан В. А.* Коррекция нестабильности термометров сопротивления.— Измер. техника, 1979, № 8, с. 47—48.
562. 6.0; 1.4 *Савченко А. А., Кочан В. А.* Повышение точности измерения температуры с помощью термоэлектрических термометров.— Там же, 1974, № 9, с. 51—53.
563. 1.4; 5.0 *Саламаха В. А., Лах В. И., Полищук Е. С. и др.* О повышении точности и стабильности платиновых термометров сопротивления.— В кн.: Новые исследования в термометрии, Львов: Вища школа, 1974, с. 41—45.
564. 5.0 *Саламаха В. А., Лах В. И., Киц А. И. и др.* Стабильность платиновых термометров сопротивления.— ПСУ, 1971, № 2, с. 49—51.
565. 5.0 *Саламаха В. А., Киц А. И., Синюшко В. Г.* Термометры сопротивления с повышенным ресурсом.— В кн.: Современные методы и приборы автоматического контроля и регулирования технологических процессов. М.: МДНТП, 1976, с. 74—77.
566. 1.3 *Салтыков О. Я., Финкельштейн В. Е., Эстрин Б. С.* Пересчет градуировочных таблиц термопар в связи с введением МПТШ-68.— Метрология, 1979, № 1, с. 16—21.
567. 4.2 *Самсонов Г. В., Кислый П. С.* Высокотемпературные неметаллические термопары и наконечники.— Киев: Наук. думка, 1965.— 181 с.
568. 6.0 *Самсонов Г. В., Кислый П. С., Панасюк А. Д.* Термоэлектрические свойства термопары с тугоплавкими твердыми электродами.— Измер. техника, 1961, № 10, с. 32—34.
569. 2.2; 5.0; 6.0 *Самсонов Г. В., Киц А. И., Кюздени О. А. и др.* Датчики для измерения температуры в промышленности.— Киев: Наук. думка, 1972.— 224 с.
570. 6.0 *Сапоцкий Я. В., Стадник Б. И.* Дестабилизация термоЭДС термоэлектрических преобразователей температур в термодинамическом аспекте.— Труды ВНИИМИУС, 1982, с. 126—131.
571. 1.3 *Сафронов Г. М., Бусоргин Ю. П.* Полуавтоматическая установка для поверки термопар.— Измер. техника, 1976, № 11, с. 68—69.
572. 1.4; 6.0 *Саченко А. А.* Анализ погрешностей измерения температуры цифровыми милливольтметрами с использованием термоэлектрических термометров.— Метрология, 1975, № 11, с. 72—76.
573. 1.4; 6.0 *Саченко А. А., Опаец М. Г., Кочан В. А. и др.* Учет погрешности нестабильности термоэлектрических термометров.— Там же, 1977, № 9, с. 55—59.
574. 1.4; 9.4 *Саянина В. И., Свет Д. Я., Ефанова Е. П.* Влияние полос поглощения атмосферы на работу пирометров в инфракрасной области спектра.— Оптико-мех. пром-сть, 1975, № 5, с. 9—12.
575. 1.4; 9.0 *Саянина В. И., Свет Д. Я.* Сравнение двух методов описания зависимости энергии излучения от температуры в пирометрии.— Метрология, 1975, № 10, с. 41—46.
576. 9.0 *Свердлов В. И.* Использование фотоприемников с различными спектральными характеристиками для повышения точности фотоэлектрического пирометра.— В кн.: Оптимизация режимов работы электроприводов и электроснабжения. Красноярск: Изд-во Кр. ПИ, 1973, с. 211—214.

577. 9.2 *Свет Д. Я.* Измерение истинных температур по собственному излучению — оптимальная оптическая пирометрия.— ИКА, 1977, вып. 1, № 47/55, с. 78.
578. 4.2; 9.0 *Свет Д. Я.* Объективные методы высокотемпературной пирометрии при непрерывном спектре излучения.— М.: Наука, 1968.— 240 с.
579. 9.2; 2.1 *Свет Д. Я.* Оптимальные методы пирометрии излучения и пути их технической реализации.— Приборостроение и автомат. контроль, 1978, № 1, с. 130—161.
580. 9.1 *Свет Д. Я.* Оптические методы измерения истинных температур.— М.: Наука, 1982.— 296 с.
581. 9.0 *Свет Д. Я.* Температурное излучение металлов и некоторых веществ.— М.: Metallurgy, 1964.— 134 с.
582. 9.3 *Свет Д. Я., Ежова Т. П., Парфинович А. Ф.* Приборы для прецизионного терморегулирования по цветовой температуре.— ТВТ, 1965, 3, № 4, с. 657.
583. 1.4; 6.0 *Свиридовский И. С., Лопань В. Р.* Погрешность термопреобразователей, обусловленная дополнительным подогревом термопары.— Измер. техника, 1975, № 1, с. 63—64.
584. 8.0 *Семенов В. С., Беспалов М. А., Петегова М. В. и др.* Малоинерционный датчик температуры на основе сегнетоэлектрического элемента.— В кн.: Сегнето- и пьезоматериалы и их применение. М.: МДНТП, 1978, с. 47—49.
585. 11.0 *Семенов В. Ф.* Цифровой термометр с линейной шкалой.— Тр. МЭИ, 1975, вып. 254, с. 130—137.
586. 1.4; 4.1 *Семерак М. М. и др.* Исследование и анализ погрешности измерения низких температур, обусловленной теплопритоком.— В кн.: Термомеханические процессы в кусочно-однородных элементарных конструкциях. Киев: Наук. думка, 1979, с. 124—132.
587. 1.1 *Сергеев О. А.* Метрологические основы теплофизических измерений.— М.: Изд-во стандартов, 1972.— 154 с.
588. 11.0 *Сердюк В. А., Харазов К. И., Травин В. К.* Многоканальный цифровой измеритель температуры.— ПСУ, 1977, № 1, с. 41—42.
589. 9.0 *Силин Л. Л., Черкасский А. Х.* Датчик температуры фотоэлектрических преобразователей энергии.— Гелиотехника, 1974, № 6, с. 13—15.
590. 6.0 *Силин С. С.* Новый способ измерения температуры в зоне шлифования методом полускусственной термопары.— Станки и инструмент, 1975, № 3, с. 32.
591. 3.0 *Симбирский Д. Ф.* Температурная диагностика двигателей.— Киев: Техніка, 1976.— 96 с.
592. 5.0 *Симбирский Д. Ф., Григорьев Л. С., Фрид А. М.* Пленочные термометры сопротивления и термопары: Обзор.— Эксперим. методы термостойкости газотурбин двигателей, 1973, вып. 1, с. 18—25.
593. 1.4; 5.0 *Сирота А. М., Гришков А. Я., Гольдштейн И. И.* Расчетная оценка погрешностей измерения температуры платиновым термометром сопротивления.— Измер. техника, 1974, № 10, с. 47—49.
594. 5.0 *Скомская М. О.* Небалансные мостовые преобразователи для измерения температуры термометрами сопротивления.— Вісн. Льв. політехн. ін-ту, 1974, № 86, с. 120—123, 150.

595. 4.1 *Скотт Р. Б.* Техника низких температур.— М. : Изд-во иностр. лит., 1962.— 415 с.
596. 8.0; 1.0 *Смагин А. Г., Мильштейн Б. Г.* Исследование основной метрологической характеристики кварцевого термометра частоты.— Измер. техника, 1975, № 7, с. 60—61.
597. 3.8 *Снежко В. Б., Скрипцын Г. К.* Прибор для централизованного измерения температур в теле плотины.— ПСУ, 1975, № 4, с. 44—45.
598. 2.1 *Современные методы и средства измерения температур.*— М. : Изд-во стандартов, 1971.— 36 с.
599. 7.0 *Соколенко В. В.* Датчик разности температур на однопереходных транзисторах.— Изв. вузов. Приборостроение, 1977, № 9, с. 116—120.
600. 3.6 *Солтик В. Я.* Бесконтактное измерение температуры жидких металлов и сплавов.— Киев : Наук. думка, 1969.— 152 с.
601. 1.0; 2.2 *Сосновский А. Г., Столярова Н. И.* Измерение температур.— М. : Изд-во стандартов, 1970.— 258 с.
602. 4.2; 2.1; 6.0 *Стадник Б. И.* Перспективы развития высокотемпературной термоэлектрической термометрии.— КИТ, 1979, вып. 25, с. 107—113.
603. 5.0 *Стадник Б. И., Бардыло А.-П. И., Мыцык Л. В.* Гидрологический термометр сопротивления.— Тр. НИИ гидрометеорол. приборостроения, 1973, вып. 29, с. 48—49.
604. 6.0; 1.4 *Стадник Б. И., Гиль Б. И., Киц И. И.* Погрешности высокотемпературных термопар.— КИТ, 1969, вып. 8, с. 102—105.
605. 6.0; 3.7 *Стадник Б. И., Гиль Б. И., Лах В. И. и др.* Длительное измерение температуры огнеупоров воздушонагревателей доменных печей.— ПСУ, 1975, № 2, с. 44—45.
606. 6.0 *Стадник Б. И., Киц И. И., Яцишин С. П. и др.* Исследование неустойчивости термоэ. д.с. вольфрам-ренийевых сплавов.— ТВТ, 1979, 17, № 13, с. 583.
607. 1.0; 4.2; 6.0 *Стадник Б. И., Куритный И. П.* К вопросу повышения метрологических характеристик высокотемпературных термопар.— В кн.: Новые исследования в термометрии. Львов : Вища школа, 1974, с. 81—84.
608. 6.0 *Стадник Б. И., Куритный И. П.* Термоэлектрические свойства монокристаллов рения.— Измер. техника, 1975, № 3, с. 39.
609. 6.0 *Стадник Б. И., Куритный И. П., Куритный Т. И.* Термоэлектрические свойства монокристаллов тантала.— Электрон. техника. Сер. Материалы, 1975, вып. 2, с. 49—53.
610. 6.0 *Стадник Б. И., Куритный И. П., Столярчук П. Г. и др.* Термоэлектрические свойства тугоплавких металлов и сплавов.— В кн.: Теплофизические свойства твердых веществ. М. : Наука, 1976, с. 89—93.
611. 4.2; 2.1 *Стадник Б. И., Куритный И. П., Яковенко С. И.* Современное состояние и перспективы развития высокотемпературной термоэлектрической термометрии.— ПСУ, 1971, № 9, с. 16—19.
612. 6.0; 4.2 *Стадник Б. И., Лах В. И.* Измерение высоких температур вольфрам-рениевыми термопарами.— В кн.: Теплофизические свойства твердых тел при высоких температурах. М. : Изд-во стандартов, 1969, с. 32—39.
613. 10.1 *Стадник Б. И., Луцык Я. Т., Лах В. И.* Резонансный

- ультразвуковой метод измерения температуры.— Измер. техника, 1977, № 2, с. 64—65.
614. 6.0; Стаднык Б. И., Самсонов Г. В. Высокотемпературные термопары.— ТВТ, 1964, 2, № 2, с. 634—647.
615. 6.0; Стаднык Б. И., Столярчук П. Г., Черный И. Ф. О необратимых изменениях термоэ.д.с. при измерении нестационарных температур.— КИТ, 1976, вып. 25, с. 170—175.
616. 4.2; Стаднык Б. И., Яцишин С. П. Пути стабилизации эксплуатационных характеристик высокотемпературных термоэлектрических термометров.— М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1977.— 41 с.
617. 6.0 Стаднык Б. И., Яцишин С. П., Куритный И. П. Термометрические свойства вольфрам-ренийевых сплавов.— В кн.: Физ.-хим. свойства сплавов рения. М.: Наука, 1979, с. 110—116.
618. 6.0 Стаднык Б. И., Яцишин С. П., Солянов Л. М. О причинах изменения термоэ.д.с. вольфрам-ренийевых сплавов.— ТВТ, 1976, 14, № 3, с. 533—537.
619. 5.0 Старковский Н. И., Онводи Ф., Шимулис В. И. Измерение температур терморезисторами.— Завод. лаб., 1978, 44, № 5, с. 563—564.
620. 8.0 Старосельева Е. А., Файнгауз С. В. Об использовании частотных кварцевых термопреобразователей при многоточечном измерении температуры.— Изв. ЛЭТИ, 1977, № 218, с. 40—43.
621. 8.0 Степина Е. И. Радиационно-стойкий кристаллический термометр.— ПТЭ, 1976, № 6, с. 201—202.
622. 4.1 Стрелков П. Г., Боровик-Романов А. С., Орлова М. П. Термодинамические исследования при низких температурах. I. Измерение температур между 12 и 300 К.— ЖЭТФ, 1954, 28, № 2, с. 345—352.
623. 7.0 Сутормин В. И., Сычев В. И. Термометр полупроводниковый поверхностный.— Автоматизация и контрольно-измер. приборы, 1974, № 4, с. 18—20.
624. 1.4 Тараян Г. И., Воронов М. С., Ионов Ю. Г. Определение индивидуальных и групповых поправок термометров сопротивления.— Тр. НИИ гидрометеорологического приборостроения, 1973, вып. 29, с. 62—68.
625. 10.6 Тараянц К. Г. Термочувствительные конденсаторы из стеклокерамики для контактных методов измерения температуры.— Тр. Кр. ПИ, 1973, вып. 36, с. 169—174.
626. 2.1; Темкин В. Л. Термометрия. Методы и приборы для измерения температур в технике.— М.; Л.: ГИЗ, 1929.— 99 с.
627. 2.1; Температура и ее измерение: Сб. докл. III Междунар. симпоз. по термометрии (Вашингтон, 28—30 окт. 1954 г.)/ Пер. с англ. под ред. А. Армонда, К. Вульфсона.— М.: Изд-во иностр. лит., 1960.— 433 с.
628. 2.1 Терешин С. Я. Опыт измерения температуры и внешней теплопроводности проволок, нагреваемых электрическим током.— Спб.: Тип В. Джанова, 1893.— 14 с.
629. 5.0 Тищенко Л. М., Шрамков А. Я. Линеаризация характеристик мостовых схем с платиновыми термометрами сопротивления.— КИТ, 1974, вып. 15, с. 95—97.
630. 1.4 Точность контактных методов измерения температуры.— М.: Изд-во стандартов, 1976.— 232 с.

- 631. 3.4 Траянов Т. Г., Летунов Ю. И., Петрова Л. Б. Измерение температуры поверхности движущейся водоохлаждаемой полосы.— Завод. лаб., 1975, 41, № 6, с. 718—719.
- 632. 9.3 Трубицкий Е. В. О номинальной характеристике преобразования пирометров спектрального отношения.— ПСУ, 1979, № 9, с. 20—22.
- 633. 1.4 Туманьян Г. Т. Линеаризация мостовой измерительной цепи многооточечного контроля температуры.— Там же, 1980, № 5, с. 21.
- 634. 10.5; 4.2 Туная О. А., Никогосян Т. Н., Месропян Г. Г. Измерение высоких температур пневматическим методом.— М.: Пневмоавтоматика, 1978.— 283 с.
- 635. 6.0; 1.4; 3.5 Турласов А. С., Тамашко Ф. О. О точности метода двух термопар для измерения температуры газа в топке.— Тр. Ленингр. кораблестроит. ин-та, 1977, № 122, с. 94—97.
- 636. 3.3 Тухтуев С. П. Прибор для измерения температуры поверхности переменной кривизны.— ПСУ, 1978, № 4, с. 39.
- 637. 4.1; 9.4 Угольников В. И. О возможности измерения низких температур по ИК-излучению в узком спектральном интервале.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 171, с. 61—64.
- 638. 5.0 Усольцев В. А. Расчет взаимозаменяемости термометров сопротивления.— Тр. НИИ гидрометеорологического приборостроения, 1978, № 35, с. 107—113.
- 639. 9.1; 1.4 Фандеев Е. И., Бараненко А. П., Луцаев Г. А. Об одном способе повышения точности низкотемпературных радиационных пирометров.— Тр. НПИ, 1974, вып. 294, с. 87—93.
- 640. 9.1; 4.1 Фандеев Е. И., Иванченко В. П., Бараненко П. П. Разработка и исследование низкотемпературных пирометров полного излучения.— Изв. Сев.-Кавк. науч. центра высш. шк. Сер. техн. наук, 1978, № 2, с. 22—26.
- 641. 1.4 Фандеев Е. И., Луцаев Г. А., Романенко Н. В. и др. Экспериментальное исследование метрологических характеристик контактных непогружаемых термоприемников с тепловыми экранами.— Тр. НПИ, 1974, вып. 294, с. 154—158.
- 642. 9.0 Фандеев Е. И., Ушаков В. Г., Луцаев Г. А. Непогружаемые термоприемники.— М.: Энергия, 1979.— 64 с.
- 643. 6.0 Федюкович А. К., Видин Ю. В. Вакуумноплотная малогабаритная термopapa.— ПТЭ, 1974, № 3, с. 232.
- 644. 6.0 Федюкович А. К., Видин Ю. В. Малоинерционный термодатчик для среды, находящейся под высоким давлением.— Завод. лаб., 1975, 41, № 10, с. 1225—1226.
- 645. 6.0 Федюкович А. К., Видин Ю. В. Технология изготовления малогабаритных термopap с электродами переменного сечения.— ПТЭ, 1977, № 1, с. 261—262.
- 646. 3.6 Филиппов Л. П. Измерение тепловых свойств твердых и жидких металлов при высоких температурах.— М.: Изд-во Моск. ун-та, 1967.— 326 с.
- 647. 3.5 Филяр Т. Точное измерение температуры газов.— Изв. вузов. Черн. металлургия, 1979, № 5, с. 133—137.
- 648. 1.3; 9.1 Фиккельштейн В. Е. Современное средство градуировки пирометров суммарного излучения: Обзор. информ.— М.: ВНИИКИ, 1977.— 59 с.

649. 7.0 *Фогельсон И. Б.* Транзисторные термодатчики.— М. : Сов. радио, 1972.— 129 с.
650. 11.0; 3.1 *Фот Н. А., Малый А. Г., Коломиец Ю. А. и др.* Цифровая измерительная система для регистрации нестационарных температурных полей.— Пробл. прочности, 1976, № 5, с. 92—94.
651. 6.0 *Фуртак С. И.* О принципиальной возможности измерения действительной температуры объектов методами шумовой пирометрии.— ТВТ, 1980, 18, № 4, с. 834—840.
652. 9.4 *Хадсон Р.* Инфракрасные системы / Пер. с англ. Я. Б. Герчикова, Ю. Е. Голубчина, С. Г. Кина. Под ред. Н. В. Васильченко.— М. : Мир, 1972.— 534 с.
653. 1.3; 6.0 *Химач О. В., Сагарда А. А.* Динамическая градуировка термоэлектрических термометров при измерении температуры шлифования.— Измер. техника, 1976, № 4, с. 55—57.
654. 1.1 *Хныков В. М.* Тройная точка аргона — новая реперная точка МПТШ-68 ниже 273,15 К.— Тр. ВНИИФТРИ, 1975, вып. 21, с. 34—39.
655. 1.1 *Хныков В. М., Орлова М. П., Шаревская Д. И.* Реперные точки государственного эталона единицы температуры в диапазоне от 13,81 до 273,15 К.— Метрология, 1973, № 12, с. 3—7.
656. 1.1 *Холл Дж.* Международная шкала температур.— В кн.: Температура и ее измерение.— М. : Изд-во иностр. лит., 1960, с. 13—41.
657. 9.4 *Цеханский Г. Н.* Радиационный инфракрасный пирометр для дистанционного измерения температуры на узлах и деталях мощных радиогенераторов.— ПТЭ, 1977, № 1, с. 287.
658. 3.0 *Цибиогин О. Г., Постнов В. К., Петашвили О. М.* Установка для поверки и градуировки средств измерений температуры газа и тепловых потоков.— Измер. техника, 1982, № 1, с. 58—59.
659. 4.1; 1.0 *Циделко В. Д.* Универсальный цифровой измеритель низких температур.— ПТЭ, 1978, № 5, с. 265.
660. 11.0; 4.1 *Циделко В. Д., Хохлов Ю. В., Туманов Ю. Г. и др.* Универсальный цифровой прибор для измерения криогенных температур в диапазоне 4—300 К.— Измер. техника, 1978, № 7, с. 59—61.
661. 9.0 *Цуринов Г. Г.* Пирометр Н. С. Курнакова. Применение при низких температурах.— М. : Изд-во АН СССР, 1953.— 63 с.
662. 3.4 *Цюппа П. Н., Савкив С. В.* Измерение температуры поверхности вращающегося тела.— Завод. лаб., 1978, 44, № 1, с. 60—61.
663. 1.4; 6.0 *Черепанов В. Я., Краснов В. А.* Об одном способе компенсации теплоотвода по термопаре при измерении температуры проводочных образцов.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1974, вып. 148, с. 56—61.
664. 3.3 *Черкасова К. Г.* Измерение температуры поверхности.— Там же, 1977, вып. 207, с. 64—68.
665. 1.3; 3.3 *Черкасова К. Г., Хаванская Е. В.* Показания поверхностного термометра при интенсивном теплообмене с окружающей средой.— Там же, 1975, вып. 181, с. 82—88.
666. 6.0; 1.4 *Черников Б. Н., Жога М. С.* Определение погрешности в показаниях термодатчиков при изменении температуры на

- ружного кольца подшипника.— Сб. тр. Всесоюз. заоч. политехн. ин-та, 1974, вып. 91, с. 88—95.
667. 1.0; 9.0 *Чистяков В. А., Гавришук В. И.* Образцовый излучатель для градуировки энергетических пирометров.— Измер. техника, 1980, № 80, с. 41—43.
668. 2.2 *Чистяков С. Ф., Радун Д. В.* Теплотехнические измерения и приборы.— М.: Высш. шк., 1972.— 392 с.
669. 9.2 *Чубарев Е. П., Емельянов А. Н., Кубышкин В. А.* Оптико-электронные сканирующие устройства для контроля и измерения температурных полей.— В кн.: Применение оптико-электронных приборов в контрольно-измерительной технике. М.: МДНТП, 1976, с. 117—121.
670. 3.4 *Чувашов Л. А., Корабельщиков Г. Ф.* Измерение температуры вращающихся частей крупных электрических машин.— ПСУ, 1976, № 6, с. 40—42.
671. 4.2; 3.7 *Чугунный Е. Г., Жуков Л. Ф.* Автоматический контроль температуры жидкого чугуна в литейном производстве.— Киев: Наук. думка, 1978.— 176 с.
672. 8.0 *Чугунов А. Л.* О дистанционном измерении градиента температур с применением кварцевых термообразователей.— Изв. ЛЭТИ, 1978, № 240, с. 49—51.
673. 2.1 *Шальников А. И., Щеголев И. Ф.* Температура и вещества.— М.: Знание, 1963.— 30 с.
674. 11.0 *Шанг Буй Ван, Зорий В. И., Ковальчук Н. Г.* Цифровой термометр.— Изв. вузов. Приборостроение, 1978, вып. 21, № 2, с. 109—112.
675. 6.0; 1.4 *Шанг Буй Ван, Полищук Е. С., Тищенко Л. М.* Повышение точности цифровых измерителей разности температур.— КИТ, 1979, № 15, с. 8—13.
676. 3.8 *Шарапов Ю. В., Егоров Д. Е.* Определение температуры изделия при сварке с помощью бесконтактного датчика.— Тр. Ленингр. кораблестроит. ин-та, 1974, вып. 92, с. 143—149.
677. 5.0 *Шахкамян С. С.* Цифровая линеаризация характеристик платинового термометра сопротивления.— Изв. вузов АН АрмССР. Сер. техн. наук, 1977, вып. 30, № 4, с. 30—36.
678. 11.0 *Шахкамян С. С., Ходжаянц Ю. М.* Цифровые термометры.— ПСУ, 1977, № 1, с. 38—40.
679. 2.2; 9.0 *Шелковый Э. А., Селиверстов В. Н.* Бесконтактные приборы контроля температуры.— Тр. ВНИИ с.-х. машиностроения, 1978, № 1, с. 104—114.
680. 2.1 *Шефер К.* Теория теплоты.— М.: Л.: Гостехиздат, 1933.— 297 с.
681. 7.0 *Шефтель И. Т.* Терморезисторы, электропроводность 3d-окислов, параметры, характеристики и области применения.— М.: Наука, 1973.— 415 с.
682. 5.0 *Шефтель И. Т., Павлоцкий Я. В., Плащинский Н. Т. и др.* Новые терморезисторы с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления.— ПСУ, 1975, № 1, с. 46—49.
683. 5.0 *Шефтель И. Т., Текстер-Проскуракова Г. Н., Лейкина Б. Б. и др.* Основные характеристики промышленных терморезисторов сопротивления.— Там же, 1971, № 9, с. 32—36.
684. 2.1 *Шиллер Н. Н.* Происхождение и развитие понятий о тем-

- пературе и о тепле: Критико-гносеол. очерк.— Киев : Тип. ун-та св. Владимира н. т. Корчак-Новицкого, 1899.— 53 с.
685. 3.3; 9.1 *Шиндеров Б. Л.* Радиационно-нулевой метод измерения температуры поверхности и его техническая реализация.— В кн.: Материалы III Всесоюз. совещ. по лучистому теплообмену. Краснодар: Изд-во Кр. ПИ, 1975, с. 132—139.
686. 1.3; 6.0 *Шипалов В. В.* Тарировка термпар в среде инертных газов.— Тр. ВНИИ абразивов и шлифования, 1975, № 16, с. 77—79.
687. 1.1 *Шкраба В. Т., Павлов В. А., Ермилова Л. Н. и др.* Магнитная шкала температур от 2 до 30 К.—Тр. ВНИИФТРИ, 1975, вып. 21, с. 5—18.
688. 10.1; 1.1 *Шкурко В. К.* О метрологической характеристике акустического термометра.— Тр. Гос. гидр. ин-та, 1978, № 235, с. 70—75.
689. 3.9 *Шолохов А. А., Засорин И. П., Мишанин В. Е. и др.* Определение температуры в стволах ядерного реактора (с жидкометаллическим теплоносителем).— М.: Атомиздат, 1978.— 229 с.
690. 9.1; 1.0 *Шпигельман Е. С.* Методы обеспечения единства измерений в области пирометрии суммарного излучения.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 183, с. 32—38.
691. 1.3; 9.0 *Шпигельман Е. С.* Рабочий эталон единицы температуры по шкале интегрального излучения для интервала 300—600 К.— Там же, с. 39—45.
692. 1.3 9.1 *Шпигельман Е. С., Ивенский С. Н.* Установка УНТ-74 для проверки низкотемпературных пирометров полного излучения.— Измер. техника, 1978, № 4, с. 47—48.
693. 1.4 *Шукинулов В. Е.* Корректирующие звенья в устройствах измерения нестационарных температур.— М.: Энергия, 1970.— 118 с.
694. 2.1; 4.2 *Экспериментальная техника и методы высокотемпературных измерений.*— М.: Наука, 1966.— 235 с.
695. 10.1; 4.2 *Эльдаров Ф. Г., Гладкий П. Д., Шилков А. И.* Акустический высокотемпературный термометр с чувствительным элементом из тонких тугоплавких звукопроводов.— Измер. техника, 1975, № 8, с. 68—69.
696. 6.0; 1.1 *Эргардт Н. Н.* Воспроизведение и передача с помощью термпар температурной шкалы в области 300—1063 °С. Исследования в области температурных измерений.— Тр. ин-тов Ком. стандартов, 1961, вып. 51, с. 73—82.
697. 6.0; 1.3 *Эргардт Н. Н.* Измерение температур вольфрам-рениевыми и вольфрам-молибденовыми термпарами и методы их градуировки.— Измер. техника, 1968, № 10, с. 24—27.
698. 6.0; 1.3 *Эргардт Н. Н.* Новый метод градуировки термпар.— Там же, 1957, № 6, с. 78.
699. 1.1; 1.0 *Эргардт Н. Н.* Обеспечение единства измерений температуры контактными методами.— Там же, 1979, № 4, с. 38—40.
700. 2.1 *Эргардт Н. Н.* Тенденция развития температурных измерений: — Итоги науки и техники. Метрология и измер. техника/ВИНИТИ, 1979, № 4, с. 5—106.
701. 1.1 *Эргардт Н. Н., Камочкина Е. М.* Повышение точности градуировки термоприемников, используемых при изме-

- рениях температуры воды.— Тр. метрол. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 157, с. 132—135.
702. 1.3; 6.0 *Эстрин Б. С.* О погрешностях градуировки образцовых термомпар, связанных с переходом на МПТШ-68.— Метрология, 1976, № 12, с. 20—29.
703. 10.8 *Ядерный* квадрупольный резонанс.— Калининград: Изд-во Калинингр. ун-та, 1977, вып. 1.— 187 с.
704. 1.3; 5.0 *Ямковой В. А., Латышева Г. И.* О сравнительной оценке точности градуировочных характеристик термометров сопротивления.— Вестн. КПИ. Сер. Приборостроение, 1975, № 5, с. 62—65.
705. 1.4 *Ярышев Н. А.* Влияние отвода тепла по датчику на точность измерения температур поверхности.— Изв. вузов. Приборостроение, 1963, 6, № 1, с. 134—141.
706. 3.1 *Ярышев Н. А.* Методы контроля нестационарных температур контактными термодатчиками.— ПСУ, 1971, № 9, с. 19—20.
707. 3.2; 8.0 *Ярышев Н. А.* Приближенная теория инерции технических термомпар и термометров сопротивления.— Тр. ЛИТМО, 1959, вып. 37, с. 64—89.
708. 6.0 *Яцишин С. П.* Термоэлектрические свойства высокочистых вольфрам-ренийевых сплавов.— Электрон. техника. Сер. Материалы, 1975, № 9, с. 120—121.
709. 10.8 *Aalto M. I.* A pulsed NMR system for nuclear thermometry below 2 K.— Rev. Sci. Instrum., 1973, 44, N 8, p. 1075—1082.
710. 4.1 *Adolf A., Djeressi H., Leszczyszyn A.* A compound carbon thermometer for the temperature range 0.3—100 K.— Ibid., 1979, 50, N 9, p. 1101—1103.
711. 10.0 *Amman C., Meier P., Merbach A. E.* A simple multinuclear NMR thermometer.— J. Magn. Reson., 1982, 46, N 2, p. 319—321.
712. 7.0 *Anderson M. S., Swenson C. A.* Characteristics of germanium resistance thermometers from 1 to 53 K and the ISU magnetic temperature scale.— Ibid., 1978, 49, N 8, p. 1027—1033.
713. 10.3 *Andres K., Wernick J. H.* A sensitive magnetometer and its application to nuclear magnetic thermometry in the compound AuIn_2 at ultralow temperatures.— Ibid., 1973, 44, N 9, p. 1186—1188.
714. 7.0 *Armstrong D. R., Hyde D. R.* Simple temperature sensing circuits using thermistors.— IPRE Rev., 1978, 38, N 3, p. 9—14.
715. 10.9 *Ambrosius Stefan.* Infrarotverfahren zur Oberflächentemperaturmessung und Drehöfen.— Silikattechnik, 1979, 30, N 4, S. 102—103; 127—128.
716. 4.2 *Asomoto R. R., Novak P. E.* A high-temperature tungsten-rhenium thermocouple.— Rev. Sci. Instrum., 1968, 39, N 8, p. 1233.
717. 6.0; 4.2 *Asomoto R. R., Novak P. E.* Tungsten-rhenium thermocouples for high temperature.— Ibid., 1967, 38, № 8, p. 1047—1052.
718. 6.0; 4.2 *Aufbau, Arbeitsweise und Einsatz von Thermoelementen.*— Elektrotechnik, 1979, 61, N 9, S. 37—83.
719. 10.6 *Aufbau und Berechnung eines transportablen Thermometers mit Flüssigkristallanzeiger.*— Elektron. ind., 1977, 8, N 7/8, S.11—12.

720. 9.0 *Bach J. H., Street P. J., Twamley C. S.* Temperature measurement of particular surfaces.— *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1970, 3, N 4, p. 281—286.
721. 6.0 *Barber C. R.* The Platinum metals in the measurement of temperature.— *Platinum Metals Rev.*, 1969, 13, N 1, p. 65.
722. 5.0 *Barber C. R., Hall J. A.* Progress in platinum resistance thermometry.— *Brit. J. Appl. Phys.*, 1962, 13, N 3, p. 147—154.
723. 1.4 *Bardon J. P.* Causes d'erreurs en thermometrie par contact dans un milieu solid.— *Rev. prat. contr. ind.*, 1975, 14, N 75, p. 21—31.
724. 6.0 *Bedford R. E.* Reference tables for platinum 20 % rodium/platinum 5 % rhodium thermocouples.— *Rev. Sci. Instrum.*, 1964, 35, N 9, p. 1177—1190.
725. 6.0 *Bedford R. E.* Reference tables for platinum 40 % rhodium/platinum 5 % rhodium thermocouples.— *Ibid.*, 1965, 36, N 8, p. 1571—1580.
726. 6.0 *Beduhn M., Heyne W.* Ein Prazisions-PtRh-Pt Thermoelement fur Forschung und Industrie.— *Feingerätetechnik*, 1967, 16, N 1, S. 254—260.
727. 8.0 *Benson B. B., Krause D. Jr.* Use of the quartz crystal thermometer for absolute temperature measurements.— *Rev. Sci. Instrum.*, 1974, 45, N 12, p. 1499—1501.
728. 1.4 *Bernhard F., Brockmann T., Blumröder G.* Statische und dynamische Temperaturmessfehler.— In: 21. Intern. wiss. kolloq. techn. hochschule ilmenau. S. 1. : S. a. 1976, H.2, S. 141—144.
729. 5.0 *Berry R. J.* Oxygen-activate thermal cycling effects in Pt resistance thermometers.— *Metrologia*, 1974, 10, N 4, p. 145—154.
730. 5.0 *Berry R. J.* Platinum resistance thermometry in the range 630—900 °C.— *Ibid.*, 1966, 2, N 2, p. 10—11.
731. 3.5 *Bertodo R. J.* A thermocouple for the measurement of gas temperatures up to 2000 °C.— *Proc. Inst. Mech. Eng.*, 1963, 177, N 5, p. 603.
732. 5.0 *Besley L. M.* Stability characteristics of carbon — glass resistance thermometers.— *Rev. Sci. Instrum.*, 1979, 50, N 12, p. 1626—1628.
733. 10.9 *Bi-metal* thermometers.— *Fact. Equip. News*, 1977 28, N 411, p. 31.
734. 9.0 *Black P. J. S.* Ein Pyrometer zur kontinuierlichen Messung der Temperatur von Aluminium Strangpressprofilen.— *Aluminium*, 1967, 43, N 1, S. 572—574.
735. 10.8; 4.1 *Bloyet D., Chozlan A., Piejus P. et al.* Accurate NMR thermometry below 1 K.— *Low Temp. Phys.* Vol. 1, New York : Plenum, 1974, p. 503—507.
736. 5.0 *Bolk W. T.* Linearisierung der Kennlinie von Pt — Widerstandsthermostern.— *Techn. Mes. atm.*, 1979, 46, N 10, S. 375—376, 381—382.
737. 6.0 *Brenner B.* Changes in Platinum Thermocouples due to Oxidation.— In: *Temperature, its measurement and control in science and industry*. New York : Reinhold, 1941, vol. 1, p. 1281.
738. 6.0; 3.5 *Buhr E., Haupf Ö.* Ein Verfahren zum Messen von Temperaturen in Gasstromungen mit Thermoelementen.— *Gas Wärme Int.*, 1974, 23, N 9, S. 339—341.

739. 5.0 *Callendar H. L.* Notes on platinum thermometry.— *Phill. Mag.*, 1899, **47**, N 2, p. 191—222.
740. 5.0 *Callender H. L.* On practical thermometrie standard.— *Ibid.*, **48**, N 3, p. 519—547.
741. 5.0 *Callendar H. L.* On the construction of platinum thermometers.— *Ibid.*, 1891, **32**, N 1, p. 104—113.
742. 5.0 *Callendar H. L.* On the construction of platinum thermometers.— *Proc. Roy. Soc.*, 1886, **41**, N 5, p. 231.
743. 5.0 *Callendar H. L.* Proposals for a standard scale of temperature based on the platinum resistance thermometer.— *Brit. Assoc. Rep.*, 1899, **3**, N 10, p. 242—243.
744. 7.0 *Camp P. G.* The roles of P. T. C. thermistors in temperature measurement and control.— *Automation*, 1979, **14**, N 1/2, p. 15—17.
745. 6.0 *Campari M., Garribba S.* The Behavior of Type K thermocouples in temperature measurement: The chromel P — Alumel Thermocouples.— *Rev. Sci. Instrum.*, 1971, **42**, N 5, p. 644—653.
746. 5.0 *Carius W. V.* Temperaturmeßschaltung mit Linearisierung für Pt 100 — Widerstandsthermometer.— *Techn. Mes. atm.*, 1981, **48**, N 4, S. 127—130.
747. 10.6 *Cesarano Arcangelo.* Naso viuenczo termometria superficial cou i cristalli liquidi.— *Termotecnica*, 1977, **31**, N 6, p. 295—304.
748. 3.5 *Chzaszcz S., Nikodeni Z., Zembrzusi M.* Pomiar temperatury plomienia pyłowego w warunkach komory generatora magneto hydrodyna-micznego.— *Pr. nauk. Inst. techn. ciepl. i mech. plom. P.Wr.*, 1977, **4**, N 20, S. 90—96.
749. 7.0 *Codreanu C., Vancea M., Truinescu L. et al.* Termistoare perls miniaturizate si utilizarea lor pentru cotrolul temperaturii.— *Bull. sci. Inst. politechn. Cluj*, 1973 (1976), **16**, N 4, p. 49—50.
750. 3.7; 9.4 *Conrad E. W., Krieger K. D.* Überwachung der ofenmanteltemperatur mittels Infrarotbildtechnik.— *Zem.-Kalk-Gips*, 1979, **32**, N 5, S. 230—233.
751. 5.0 *Coruccini R.* Annealing of platinum for thermometry.— *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1954, **47**, N 3, p. 94.
752. 1.1 *Crovini L., Bedford R. E., Mozer A.* Extended list of secondary reference points.— *Metrologia*, 1977, **13**, N 4, p. 197—206.
753. 10.6 *Czajewski J.* Wlasnosce elementow solinowych i ich wykorzystanie do pomiarow temperatury.— *Pr. nauk Warsz. elek.*, 1977, **3**, N 45, S. 112.
754. 5.0 *Czarnota Irena, Tabaka A., Ciepienko Ryszard.* Oporowy czujnik do pomiarow temperatury pod wysokimi cisnieniami.— *Pomiary. Automat. Kontr.*, 1979, **25**, N 5, S. 158—160.
755. 6.0 *Darling A. S.* Rhodium — platinum alloys.— *Platinum Metals Rev.*, 1961, **6**, N 1, p. 58.
756. 9.4 *Das Tragbare Teistrahlungs — Pyrometer INFRATHERM 1S3 D-MB 20.* — *Fachber. Hüttenprax. Metallweiterverarb.*, 1977, **15**, № 5, S. 497.
757. 2.2; 10.7 *Defieis A., Priou A.* Les mesures de temperatures de corps soumis à un rayonnement électromagnétique.— *Colloq. l'eurbanne*, 1977, **4**, N 3, p. 1—13.
758. 3.8 *Descamps Y.* Les mesures de température en sécurité intrinsèque.— *Techn. mod.*, 1977, **69**, N 2, p. 63—65.

759. 11.0 *Digital* Anzeigendes Temperaturmessgerät.— *Industria-Anzeiger*, 1977, 99, N 66, S. 1279.
760. 11.0; 10.2 *Digitales* Fieberthermometer.— *Techn. Rasch.*, 1977, 69, N 10, s. 11.
761. 11.0; 3.8 *Digitales* Sekundenthermometer für (Ex) — Bereiche.— *Elektriker*, 1979, 18, N 6, S. 148.
762. 11.0 *Digital* Sekundenthermometer.— *Techn. Mes. atm.*, 1978, 45, N 1, S. 32, 34.
763. 11.0 *Digitales* Temperaturmessgerät THERM 2220—3; jetzt mit zwei umschaltbaren Bereichen.— *Fachber. Hüttenprax. Metallweiterverarb.*, 1977, 15, N 7, S. 635.
764. 11.0 *Digital* thermometer.— *Fact. Equip. News*, 1977, 28, N 411, p. 80.
765. 7.0; 11.0 *Digital* thermometer — controllers.— *Cryog. Inform. Rept.*, 1977, 15, N 2, p. 13.
766. 6.0; 3.0 *Ditterich K.* Problem bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen.— *Z-VDI*, 1961, 103, N 1, S. 875—879.
767. 4.1; 8.0 *Dodson B., Low T., Mochel J.* Low-temperature thin graphite film thermometers.— *Rev. Sci. Instrum.*, 1977, 48, N 3, p. 290—291.
768. 3.3 *Draht* — Temperatur — Messgerät. Typ DT.— *Fachber. Hüttenprax. Metallweiterverarb.*, 1977, 15, N 9, S. 790.
769. 6.0 *Druminski R.* Messung der Temperaturen beim Gewindeschleifen mit Hilfe von Thermoelementen.— *Industrie Anzeiger*, 1978, 100, N 25, S. 34—35.
770. 9.0; 3.3 *Drury M. D., Percy K. P., Land T.* Pyrometer for surface—temperature measurement.— *J. Iron and Steel Instrum.*, 1951, 169, N 3, p. 245—250.
771. 1.4; 4.1 *Durieux M., Astrov D., Kamp W. R. G. et al.* The derivation and development of the 1976 provisional 0.5 K to 30 K temperature scale.— *Metrologia*, 1979, 15, N 2, p. 57—63.
772. 1.0 *Easton G. D.* Temperature measurement and control.— *Automation*, 1976, 11, N 10, p. 7—9, 11.
773. 7.0 *Edward Bruce C.* Temperature measurement thermistors.— *Austral. J. Instrum. and Control.*, 1974, 30, N 5, p. 17—19.
- 2.1 *Einstein A.* Zur Quantentheorie der Strahlung.— *Phys. Zeitschrift*, 1917, 18, N 1, S. 12.
774. 9.2; 1.4 *Einzig R. E., Mundy J. N.* Effect of scattered light on temperature measurement by optical pyrometry.— *Rev. Sci. Instrum.*, 1976, 47, N 12, p. 1547—1550.
775. 9.0 *Engel F.* Temperaturmessungen mit Strahlungspyrometern.— *Berlin: VEB Verlag Technik*, 1974.— 80 S.
776. 9.0 *Euler K. J.* Messung der wahren Temperatur in der optischen Thermometrie.— *Chem. Ing.— Techn*, 1966, 38, N 4, S. 154—159.
777. 1.1; 5.0; 6.0; 9.0 *Evans J. P.* Note on the relation between resistance thermometer, thermocouple and radiation temperature scales: 630—1064 °C.— *Metrologia*, 1977, 13, N 4, p. 171—172.
778. 5.0 *Evans J. P., Wood S. D.* An Intercomparison of high temperature platinum resistance thermometers and standard thermocouples.— *Ibid.*, 1971, 7, N 3, p. 11.
779. 1.3 *Fairbairn G.* New developments in calibration systems using the fluidized bed technique.— *Adv. Instrum.*, 1975, 30, pt 1, p. 802/1 — 802/7.
780. 6.0 *Fairchild C. O., Schmitt H. M.* Life tests of platinum/platinum — rhodium thermocouples.— *Chem. Met. Eng.*, 1967, 26, N 4, p. 158.

781. 9.0 *Fastie W. G.* An emissivity independent radiation pyrometer.— *J. Opt. Soc. Amer.*, 1951, **41**, N 3, p. 872.
782. 7.0 *Fischer H.* Temperaturaufnehmer auf Halbleiterbasis — Grundlagen und Anwendung.— *Techn. Mes. atm.*, 1978, **45**, N 10, S. 343—350.
783. 3.5; 9.0 *Flammenpyrometer* zum berührungslosen Messen der Flammentemperatur. — *Materialprüfung*, 1979, **21**, N 6, S. 214.
784. 3.0 *Förster H. J.* Automatische Aufzeichnung des Frequenz — Temperatur — Verlaufs von Schwing — quarzen.— *Frequenz*, 1977, **31**, N12, S. 375—381.
785. 3.7 *Flours à atmosphère: contrôle de température.*— *Mach. mod.*, 1979, **40**, N 835, p. 65—66.
786. 6.0 *Freeman R. J.* Thermoelectric stability platinum vs platinum — rhodium thermocouples.— In: *Temperature, its measurement and control in science and industry*. New York : Reinhold, 1962, vol. 3, pt. 2, p. 201.
787. 6.0; 1.4 *Froschauer L., Schmidt H.* Temperature measurement with Pt — Rh-thermocouples-causes of errors and failure.— *Interferam*, 1977, **26**, N 2, p. 138—140.
788. 6.0 *Froschauer L., Schmidt H.* Problem bei der Temperaturmessung mit Pt — Rh-Thermoelementen. — *Keram. Z.*, 1976, **28**, N 7, S. 346—348.
789. 3.7 *Gauter H.* Optische Gewölbetemperaturmessung am Siemens — Martin — Ofen, Fehler und ihre Beseitigung.— *Stahl und Eisen*, 1966, **86**, N 21, S. 1402—1407.
790. 7.0 *Gentile D., Hassenzahle W., Polak M.* Temperature measurements using a monofilamentary superconducting NbTi wire in the current sharing state.— *Cryogenics*, 1980, **20**, N 1, p. 37—40.
791. 9.4 *Gerber D.* Möglichkeiten und Grenzen der berührungslosen Temperaturmessung mit infrarotstrahlen.— *Nachrichtentechn.* — *Elektronik*, 1978, **28**, N 4, S. 144—147.
792. 7.0 *Gerber J. A., Sellmyer D. I.* Anomalous behaviour of silicon diode thermometers.— *Cryogenics*, 1978, **18**, N 10, p. 619—620.
793. 7.0 *Germanium* resistance thermometer.— *Cryog. Inform. Rept.*, 1977, **15**, N 2, p. 11.
794. 6.0 *Getting I. C., Kennedy G. C.* Effect of Pressure on the Emf of Chromel-Alumel and Platinum — Platinum 10 % Rhodium Thermocouples.— *J. Appl. Phys.*, 1970, **41**, N 5, p. 4552.
795. 1.1 *Geyer F., Wahls E.* Darstellung der Temperaturskala oberhalb 1337.58 K mit einem fotoelektrischen Messverfahren.— *Feingerätetechnik*, 1977, **26**, N 9, S. 416—418, 394.
796. 3.5 *Gower M. C.* Measurement of gas temperature in a CO_2 — H_2 —He tea amplifier using laser interferometry.— *Opt. Commun.*, 1974, **12**, N 3, p. 246—247.
797. 7.0 *Greenfield A. J., Liebermann D.* Optimized interpolation fitting to Ge resistance thermometer characteristics.— *Rev. Sci. Instrum.*, 1974, **45**, N 11, p. 1417—1422.
798. 3.6 *Greenberg H. J.* Temperature measurements in the glass industry.— *Ind. Heat.*, 1974, **41**, N 6, p. 32—42.
799. 10.7 *Griffing B. F., Shivaspankar S. A.* Use of light — emitting diodes as temperature sensors.— *Rev. Sci. Instrum.*, 1977, **48**, N 9, p. 1225—1226.

800. 1.1 *Guenther K., Radtke R. A.* Proposed radiation standard for the visible and uv region.— *J. Phys. E.: Sci. Instrum.*, 1975, 8, N 5, p. 371—376.
801. 1.1; 1.2 *Guildner L. A.* Appraisal of interpolation instruments for the international practical temperature scale from 630,74 to 1064,43 °C.— *Metrologia*, 1979, 15, N 1, p. 1—4.
802. 1.1 *Guildner L. A., Edsinger R. F.* Deviation of international practical temperatures from thermodynamic temperatures in the temperature range from 273,16 K to 730 K.— *J. Res. Nat. Bur. Stand. A*, 1976, 80, N 5/6, p. 703—738.
803. 2.2 *Hall J.* A guide to temperature monitoring.— *Instrum. and Contr. Syst.*, 1978, 51, N 6, p. 57, 59—68.
804. 7.0 *Hang Eberhard.* Lineare Temperaturmessung mit Doppel-diode.— *Elektronik*, 1977, 26, N 8, S. 65—66.
805. 2.2 *Harrison T. R.* Radiation pyrometry and its underlying principles of radiat heat transfer.— New Vork; London : Wiley, 1960.— 356 p.
806. 3.5 *Hatami Rasi.* Dynamische Messung hoher Temperaturen in strömenden Gasen mit Thermoelementen.— *Chem. Ing.— Techn.*, 1977, 49, N 6, S. 519.
807. 9.0 *Haupt L.* Pyrometrische Verfahren zum Messun der wahren Oberflächentemperatur.— *Feingerätetechnik*, 1977, 26, N 3, S. 125—127.
808. 9.4 *Hecht G. J.* A two wavelength near infrared pyrometer.— In: *Temperature, its Measurement and control in science and industry.*— New Vork : Reinhold, 1962/63, vol. 3, pt 2, p. 407—417.
809. 6.0 *Heime A. J.* Temperature measurement by thermocouples.— *Automation*, 1976, 11, N 11/12, p. 23, 25, 27.
810. 1.4 *Hennecke D. K., Sparrow E. M.* Local heat sink on a convectively cooled surface — application to temperature measurement error.— *Int. J. Heat. Mass. Transfer*, 1970, 13, N 2, p. 15.
811. 5.0 *Henning F., Otto J.* Temperaturmessung.— *Phys. Z.*, 1936, 37, N 3, S. 601—633.
812. 2.2 *Henning F.* Temperaturmessung.— Leipzig ; Iohann Ambrosius Barth, 1977, 358 S.
813. 6.0; 4.2 *Hesse Lutz.* Bis 2000 °C und darüber. Temperaturmessungen mit Mantel — Thermoelementen.— *Elektrotechnik*, 1975, 57, N 7, S. 24—26.
814. 4.2 *Hesse L.* Miniatur — Mantel — Thermoelemente. Universelle Temperaturfühler für den Bereich von 200 ... + + 2000 C.— *Industrie Anzeiger*, 1974, 95, N 82, s. 1854—1858.
815. 10.6 *Hess T. G.* Nicrosil-nicrosil-nisil; high performance thermocouple alloys.— *ISA Trans.*, 1977, 16, N 3, p. 81—84.
816. 5.0 *High* precision high temperature standard.— *Technocrat*, 1974, 7, N 12, p. 61.
817. 6.0 *Hill J. S.* Fibro platinum for thermocouple elements.— In: *Temperature, its measurement and control in science and industry.*— New York : Reinhold, 1962, vol. 3, pt. 2, p. 157.
818. 6.0 *Hill J. S.* The use of fibro platinum in thermocouple elements.— *Engelhard Industr. Tech. Bull*, 1961, 2, N 3, p. 85.
819. 9.0 *Hill W. E.* Two colour pyrometer.— In: *Temperature, its measurement and control in science and industry.* New York : Reinhold, 1962/1963, vol. 3, pt. 2, p. 167.

820. 1.4 *Hoffmann D.* Einfluss Abbitiver und Multiplikativer Messfehler auf die Genauigkeit von Temperaturmessungen.— Mess-Steuern-Regeln, 1979, 22, N 7, S. 393—396.
821. 9.0 *Hoffman F., Tingwaldt C.* Wirksame Wellenlänge in optischer Pyrometrie.—Z. Instrumentenkunde, 1939, 1, N 1, S. 20.
822. 9.0 *Hoffman F.* Über den Gebrauch von Rauchgläsern in der Pyrometrie.— Z. Physic, 1927, 17, N 3, S. 1.
823. 6.0 *Hoffman H., Schwe H.* Temperaturmessungen an dünnen Aufdampfschichten mit Aufgekämpften Gold — Platin-Thermoelementen.— Vak.— Techn., 1974, 23, N 7, S. 203—208.
824. 3.4 *Hoffman W.* Programmierbares Temperaturmessgerät.— Feingerätetechnik, 1977, 26, N 2, S. 88—89.
825. 1.1; 4.1 *Hoge H. J., Brickwedde F. G.* Establishment of a temperature scale for the calibration of thermometers between 14° and 83 °K.— Bureau Stand. J. Res., 1939, 22, N 5, p. 351—373.
826. 3.1 *Hojstrup J., Rasmussen K., Larsen S. E.* Dynamic calibration of temperature wires in moving air.— DISA Inform., 1977, 5, N 21, p. 33.
827. 9.0 *Holberg L., Kurlbaum F.* Über ein optisches Pyrometer.— Ann. Phys., 1903, 10, N 3, S. 226—241.
828. 7.0 *Hole V. H. R.* Sie Funlen Heiss und Kalt. NTC Thermistoren zum Messen und Regeln von Temperaturen.— Elektrotechnik (BRD), 1975, 57, N 8, S. 18—20.
829. 10.2 *Hollander I. T.* Een vergelijkend onderzoek van elektrische thermometers.— Ned. tijdschr. geneesk., 1976, 120, N 46, S. 2002—2010.
830. 6.0 *Homewood C. F.* Factor affecting the life of platinum thermocouples.— In: Temperature, its measurement and control in science and industry. New York: Reinhold, 1941, vol. 1, pt. 2, p. 1272.
831. 3.3 *Hunter L. W., Schacke H., Grunfelder C. et al.* Surface temperature measurements in the moving wire technique.— Combust. Sci. and Technol., 1977, 15, N 1/2, p. 41—48.
832. 5.0 *HVAC* resistance thermometers.— FEN, 1979, 14, N 8, p. 62.
833. 9.4 *Infrared* thermometer with pyroelectric detector.— Technocrat, 1975, 8, N 3, p. 70
834. 9.4 *Infrarot* — Strahlungsthermometer mit Fiberoptik.— Fachber. Hüttenprax. Metallweiterverarb., 1977, 15, N 1, S. 90.
835. 5.0 *Internationale* messtechnische Empfehlungen.— PTB — Mitt., 1975, 85, N 2, s. 146—149.
836. 9.0 *Intrieri A. J.* Optical fibres look around obstacles to measure temperature.— Contr. Eng., 1977, 24, N 12, p. 42—44.
837. 9.1 *Intrieri A. J.* Strahlungsthermometer mit Glasfaserbündel Erschliesst neue Anwendungsbereiche. — Messen und Prüfen, 1978, 23, N 12, S. 849—850, 859.
838. 1.4; 6.0 *Jen Chen Ching, Li Peter.* Theoretical error analysis of temperature measurement by an embedded thermocouple.— Lett. Heat and Mass Transfer., 1974, 1, N 2, p. 171—179.
839. 6.0 *Jensen J. T., Klebanoff J., Haas G. A.* Thermocouples errors using Pt/Pt—Rh thermocouples on Ni surfaces.— Rev. Sci. Instrum., 1964, 35, N 3, p. 1717.
840. 6.0 *Jewell R. C., Knowles E. G.* Behaviour of Platinum / Platinum — rhodium thermocouples of high temperatures.— J. Sci. Instrum., 1951, 28, N 10, p. 353.
841. 9.0 *Jones T.* Realisation of JPTS — 68 using NSL photoelectric pyrometer.— Metrologia, 1972, 8 N 1, p. 4.

842. 10.4 *Joues B. K.* Electrical noise thermometer.— *Appl. Phys.*, 1978, 16, N 1, p. 99—102.
843. 3.5; 10 *Jule A. J., Taylor D. S., Chigier N. A.* On-line digital compensation and processing of thermocouple signals for temperature measurement in turbulent flames.— *AIAA Pap.*, 1978, 11, N 30, p. 9.
844. 1.4 *Kaczmarek Z.* Wplyw montazy na dokladnosc wskazan termometrow termoelektrycznych.— *Pomiary Automat. Kontr.*, 1974, 20, N 3, S. 128—132.
845. 10.6 *Kager A.* Temperaturmessung und Registrierung mit temperaturabhängigen Chemikalien.— *Ind. Elek. Elektron*, 1974, 19, N 23/24, S. 513—514.
846. 3.8 *Kahmann W.* Ein Taster mit selbstätiger Fehlerkompensation für Erwärmungsmessungen an elektrischen Maschinen.— *PTB — Mitt.*, 1976, 86, N 5, p. 10.
847. 10.6 *Kaiser E.* Temperaturfeldmessung mit Flüssigkristallen in der Umgebung von Berührungs thermometern.— *Mess.-Steuern.-Regeln*, 1979, 22, N 3, S. 122—124, 178, 179.
848. 3.5 *Kandefer S., Pietrzyk Z.* Pomiar temperatury plomienia.— *Czasop. Techn.*, 1976, 80, N 1, S. 15—21.
849. 9.6 *Kaplan H., Leftwich R. F.* A guide to infrared temperature measurements.— *Instrum. and Contr. Syst.*, 1978, 51, N 1, p. 33—35.
850. 10.9 *Katona Z.* Az electromos lazmeres technika.— *Mérés és automat*, 1979, 27, N 8, s. 297—302.
851. 9.0 *Kelsall D.* An automatic emissivity compensated radiation pyrometer.— *J. Sci. Instrum.*, 1963, 40, N 1, p. 1—4.
852. 1.1 *Kemp R. C., Bisley L.M., Kemp W. R.G.* A proposal for a practical temperature scale between 1 K and 273 K.— *Metrologia*, 1978, 14, N 4, p. 137—142.
853. 6.0 *Kent J. H.* A noncatalytic coating for platinum — rhodium Thermocouples.— *Combust. and Flame*, 1970, 14, N 3, p. 279.
854. 3.2 *Kerlin T. W., Miller L. F., Hashemian H. M.* In-situ response time testing of platinum resistance thermometers.— *ISA Trans.*, 1978, 17, N 4, p. 71—88.
855. 10.2 *Kirenkov I. I.* Measurement of thermodynamic temperatures by a gas thermometer.— In: *Temperature, its measurement and control in science and industry*. New York : Reinhold, 1962, vol. 3, pt. 1, p. 147.
856. 1.1 *Kirenkov I. I.* Die Thermodynamische und die internationale praktische Temperaturskale.— *Instrumentenkunde*, 1963, 2, N 71, S. 43.
857. 3.3; 9.0 *Kolbow P.* Neue Strahlungs-pyrometer für Glasktemperaturmessungen.— *Sprechsa*, 1969, 102, N 1, S. 9—12.
858. 3.6 *Kreibich F., Dossow H.* Kontinuierliche Temperaturmessung während der Fertigmachperiod.— *Neue Hütte*, 1976, 21, N 8, S. 488—491.
859. 9.0 *Land T., Barber R.* New pyrometers for glass and other surfaces.— *J. Soc. Technol.*, 1954, 38, N 3, p. 53—54.
860. 7.0 *Lanik R. et al.* The use of the interbase resistance of the unijunction transistor as a thermometer in the 20—300 K range.— *Rev. Sci. Instrum.*, 1974, 45, N 1, p. 1456—1457.
861. 3.8 *Lasowski J. W., Andrzej K. E.* Czujniki termometrow elektrycznych odporne an dzialanie czynnikow agresywnych.— *Pomiary Automat. Kontr.*, 1975, 21, N 1, p. 11.

862. 9.4 *Leclerc G.* Mesure de temperatures par pyrometres infrarouges.— *Trait. surface*, 1976, 17, N 149, p. 19—21.
863. 1.4 *Libeau W. D.* Abschätzung der Messunsicherheit bei der Temperaturmessung mit Thermoelementen und Widerstandsthermometern.— *Mess.— Steuern — Regeln*, 1977, 20, N 3, S. 155—158.
864. 3.3 *Lindorf H.* Das Bessen der Oberflächen temperatur auf festen Körpern.— *Elek. Anz.*, 1975, 28, N 3, S. 43—45.
865. 2.2 *Lochman J. C., McGurty J. A.* The use of refractory metals for ultra high temperature thermocouples.— In: *temperature, its measurement and control in science and industry.*— New York : Reinhold, 1962, vol. 3, pt. 2, p. 177.
866. 2.2 *London Alan.* Thermometers — a look at the opinions and a guide to suppliers.— *Contr. and Instrum.*, 1975, 7, N 6, p. 33, p. 35—37.
867. 3.8 Löttemperaturmessapparat Verbessert die Fertigungsqualität.— *Technika*, 1974, 23, N 24, S. 2195—2196.
868. 9.1 *Lotzer W.* Berührungslose Temperaturmessung. Richtiger Einsatz von Strahlungspyrometern Nach dem Heutigen Stand der Technik.— *VDI — Nachr.*, 1976, 30, N 35, S. 6—7.
869. 2.1 *Lotzer W.* Elektrische Temperaturmessung Möglichkeiten und Tendenzen.— *Maschinenmarkt*, 1978, 84, N 52, S. 1033—1036.
870. 9.0 *Lotzer W.* Temperaturen Berührungslos Messen.— *Elektrotechnik*, 1977, 59, N 22, s. 15—18, 20—22.
871. 6.0 *Lyusternik V. E.* Reproducibility of the calibration of platinum/platinum rhodium thermocouples over a wide temperature range.— *High Temp. Sci.*, 1963, 10, № 1, p. 120.
872. 6.0 *Macdonald N. H.* Temperature measurement using thermoelectrical thermometry.— *Electron*, 1977, 1, N 112, p. 19—20, 22—24.
873. 2.2 *Mackenzie D. M., Kehret W. E.* Review of temperature measurement techniques. Part. 1. Optimizing the sensor/instrument interface.— *Instrum. Technol.*, 1976, 23, N 9, p. 43—48.
874. 3.5 *Manahan F. A. et al.* A new approach to spatially resolved flame temperature measurements.— *Appl. Spectrosc.*, 1979, 33, N 2, p. 145—150.
875. 2.2 *Marchidau D. I.* Temperatur. Scari, metole si mijloace de masurare.— *Ed. sti. si. encicloped.*, 1977, 1, N 3, p. 160.
876. 5.0 *Marchlewski K.* Przenosny miernik do pomiaru temperatury z a pomoce czujnikow oporowych.— *Pomiary. Automat. Kontr.*, 1974, 20, N 10, S. 466.
877. 10.2 *Marketing* of liquid crystal thermometer for domestic use.— *Technocrat*, 1975, 8, N 1, p. 70.
878. 10.4 *Marshak H., Soulen R. J.* The temperature and noise Thermometry.— *Low Temp. Phys.* vol. 1. New York: Plenum, 1974, p. 498—502.
879. 6.0; 4.2 *Marshall R. W.* Design criteria for platinum — rhodium alloy sheath thermocouples for stable operation above 1300 °C.— *Adv. Instrum.* 1976, 31, Pt 3, p. 766/1—766/6.
880. 1.4 *Masters J. I., Stein S.* Effect of an axial cavity on the temperature history of a surface heated slab.— *Rev. Sci. Instrum.*, 1956, 27, N 12, p. 71—17.
881. 3.4 *Mathew M., Rao K. V. C., Sastri V. M. K.* Temperature measurement in rotating systems.— *Indian J. Technol.*, 1977, 15, N 2, p. 229—231.

882. 10.1 *Mauermann W.* Ultraschall-Messung Schnell Veränderlicher Gastemperaturen.— *Elektronik*, 1975, 24, N 5, S. 69—72, 99.
883. 1.1; 1.2 *McLachlan A. D., Uchiyama H., Saito T. et al.* The stability of the freezing point of copper as a temperature standard.— *Bull. Nat. Res. Lab. Metrol.*, 1974, 11, N 28, p. 34—40.
884. 1.1 *Melaren E. P.* The freezing points as temperature standards.— *Canad. J. Phys.*, 1957, 35, N 3, p. 1096.
885. 3.6 *Menge K.* Oberflächen — Temperaturmessung beim Stranggießen.— *Siemens — Z.*, 1971, 45, N 5, S. 640—642.
886. 9.4 *Menge K., Thieme R.* Farbpyrometer Ardocol mit temperaturlinearem Stromausgang.— *Siemens-Z.*, 1973, 47, N 6, S. 747—750.
887. 3.4 *Mester V., Glockmann W.* Ein neues Verfahren zur Temperaturbestimmung an laufenden Fäden.— *Z. Textilbetrieb*, 1973, 30, N1/2, S. 43—45.
888. 3.3 *Miniatur-Thermoelemente* zur Oberflächentemperaturmessung.— *Industrie-Anzeiger*, 1977, 99, N 76, S. 1485.
889. 9.4 *Misst Temperatur* unter IR — Strahlen.— *Betriebs-Mag. Serv.*, 1974, 15, N 11, S. 61.
890. 9.4; 10.2 *Modido* de la temperatura de un cuerpo mediante la detección de sus radiaciones infrarrojas.— *Quim. e. ind.*, 1975, 21, N 6, p. 621—624.
891. 1.1; 5.0 *McLaren E. H.* The freezing points of high purity metals as precision temperature standards. II. An Investigation of the freezing temperatures.— *Canad. J. Phys.*, 1957, 35, 10, p. 1086—1106.
892. 11.0; 6.0 *Monday M.* Moderne Techniken für Temperaturmessungen mit Thermoelementen und Digitaler Messwertanzeige.— *Messen und Prüfen*, 1977, 22, N 12, S. 809—810, 812—813.
893. 1.5; 6.0 *Monger R.* Thermocouple cold junction compensation for portable instruments.— *Contr. and Instrum.*, 1978, 10, N 8, p. 35—37.
894. 2.1 *Moser A.* Evolution des échelles de température.— *Bull. inform. Bur. nat. métrol.*, 1975, 6, N 20, p. 25—30.
895. 9.0 *Murrey T. P.* Polaradiometer — a new instrument for temperature measurement.— *Rev. Sci. Instrum.*, 1967, 38, N 4, p. 791—797.
896. 9.0 *Murrey T. P., Beedal G. J.* The polaradiometerpyrometer.— *Instrum. and Contr. Syst.*, 1971, 44, N 2, p. 115—118.
897. 3.6 *Naeser G., Pepperhoff W.* Verfahren zur Ermittlung der Schmelztemperatur in blasenden Konverter.— *Stahl und Eisen*, 1950, 70, N 1, S. 22—24.
898. 1.1 *Negro G.* Matérialisation de l'échelle internationale pratique de température audela de 1337, 58 K.— *Bull. inform. Bur. nat. métrol.*, 1974, 5, N 17, p. 23—28.
899. 3.5; 9.0 *Neue Präzisions-Pyrometer* messen hohe Gastemperaturen.— *Process Eng.*, 1979, Mai-Juni, S. 192—193.
900. 9.4 *Neues Infrarot* — Temperaturmessgerät.— *Kunstst. J.*, 1975, 9, N 4, S. 34.
901. 9.3 *Neues Strahlungspyrometer*.— *Regelungstechn. Prax.*, 1976, 18, N 11, S. 316.
902. 4.2 *Neugebauer J., Körtvelyessy L.* 2600 °C.— ig használható magyar wolfram — rhenium hőelem.— *Mérés és Automatika*, 1966, 12, N 5, p. 365—372.

903. 7.0 *Neuer Temperatürmesser mit austauschbaren Halbleiterfühlern.*— Kunstst. J., 1973, 7, N 9, S. 33.
904. 9.4; 4.2 *Non-contact temperature measurement system.*— Mach. and Prod. Eng., 1977, 131, N 3376, p. 184.
905. 3.3; 3.1 *Oberflächentemperaturmessung in Einer Millisekunde.*— Masch.— Anlag.— Verfahr., 1977, 9, N 3, S. 57.
906. 6.0 *Obrowski W., Prinz W.* Neue bestimmte Grundwerte für die Thermopaarkombination Pt 30 % Rh—Pt 6 % Rh.— Arch., 1962, 33, N 2, p. 1.
907. 10.8 *Ohte Akira, Iwaoka Hideto.* A precision nuclear quadrupole resonance thermometer.— IEEE Trans. Instrum. and Meas., 1976, 25, N 4, p. 357—362.
908. 7.0 *Ohte Akira, Yamagata Michiaki.* A precision silicon transistor thermometer.— Ibid., 1977, 26, N 4, p. 335—341.
909. 6.0 *Olkusnik L.* Czujnik termometru termoelektrycznego, typ TTV62.— Pomiar Autom. Kontr., 1977, 23, N 8, S. 319.
910. 9.2 *Optical pyrometer.*— Austral. Process Eng., 1977, 5, N 9, p. 51.
911. 9.2 *Optical pyrometer using solar cell.*— Technocrat, 1976, 9, N 7, p. 71.
912. 1.1 *Paine A.* A working man's guide to IPTS.— 68.— PACE, 1975, 28, N 3, p. 7—9.
913. 3.4 *Porebski W.* Optymalny układ do pomiaru temperatury wirujących części maszyn.— Pomiar Autom. Kontr., 1974, 20, N 299/301, p. 12.
914. 11.0 *Portable digital thermometer.*— Pulp. and Pap., 1977, 51, N 14, p. 172.
915. 9.0 *Poskacey A. A.* Strahlungsmessung von Temperatur unter 800°.— Cvetnye metally, 1963, 36, N 9, S. 76—79.
916. 2.0; 2.2 *Potts J. F., McElroy D. L.* Temperature, its measurement and control in science and industry.— New York :Reinhold, 1962, vol. 3, pt 2, p. 243—264.
917. 3.0 *Praktisches Löttemperatur* — Messgerät Verbessert die Fertigungsqualität.— Elec.-Rev. (Suisse), 1974, 66, N 38, S. 1329.
918. 4.2; 9.0 *Präzisions-Pyrometer für hohe Temperaturen.*— Industrie Anzeiger, 1979, 101, N 13, S. 21.
919. 9.0 *Pyrometer mit Lichtleiter.* ST 2001.— Chem. Techn. (BRD), 1977, 6, N 7, S. 296.
920. 9.2 *Quinn T. J.* Corrections in optical pyrometry for the refractive index of air.— Metrologia, 1974, 10, N 3, p. 115.
921. 4.2 *Quinn T. J., Barber C. R.* A lamp as a reproducible source of near black — body radiation for precise pyrometry up to 2700 °C.— Ibid., 1967, 3, N 1, p. 19—23.
922. 9.0 *Quinn T. J., Compton J. P.* The foundations of thermometry.— Repts. Progr. Phys., 1975, 38, N 2, p. 151—239.
923. 1.4 *Ralliomann R., Wallin P.* Measurement of surface temperature with a thermally compensated probe.— J. Phys. Eng. Sci. Instrum., 1971, 4, N 7, p. 17.
924. 7.0 *Raska S.* Diodove teplomery.— Sdelov. Techn., 1977, 25, N 12, p. 449—451.
925. 3.3 *Raudszus O.* Messen der Oberflächentemperatur an Schlechten Wärmeleitenden Stoffen.— Maschinenmarkt, 1976, 82, N 84, S. 1542—1545.
926. 2.1 *Recalic M., Nebe W.* Beugungsinterferenzverfahren zur Temperaturmessung am Freibrennenden Gleichstrombogen.— Exp. Techn. Phys., 1974, 22, N 5, S. 467—476.

927. 10.9 *Reisinger H., Eneberg M. E.* Temperaturmütning med koncentrisk bimetallspiraler.— Automation, 1977, 12, N 4, S. 33—36.
928. 10.2 *Reiss F. E.* Heat pipe as a means of avoiding emergent stem correction for liquid — in — glass thermometers.— Rev. Sci. Instrum., 1974, 45, N 9, p. 1157—1158.
929. 2.0; 1.4 *Robertson D., Sterbutzel J. A.* An accurate surface temperature measuring system.— IEEE Trans. Ind. General Appl., 1970, 4, N 7, p. 16.
930. 5.0 *Robertson D., Walsch K. A.* Calibration techniques for precision platinum resistance thermometers.— In: Temperature, its measurement and control in science and industry. New York: Reinhold, 1962, vol. 3, pt 1, p. 291—299.
931. 1.4; 6.0 *Roberts M. J., Kollie T. G.* Derivation and testing of a model to calculate electrical spunting and leakage errors in sheathed thermocouples.— Rev. Sci. Instrum., 1977, 48, N 9, p. 1179—1191.
932. 10.2 *Romanszyk B., Gordon W. C., Kashinsky W. M.* Measuring circadian cycles. A simple temperature recording preparation.— Behav. Res. Meth. and Instrum, 1977, 9, N 4, p. 393—394.
933. 1.4 *Rosenberg R. J.* How accurate are your process temperature measurements? — Adv. Instrum., 1975, 30, pt 4, p. 827/1 — 827/5.
934. 8.0; 11.0 *Rozwadowski M., Csarnecki A.* Cyfrowy Termometr kwarcowy typ 511B.— Pomiary. Automat. Kontr., 1977, 23, N 2, p. 50—51.
935. 6.0 *Sagoschen J.* Temperaturmessung mit Platinmetall — Thermoelement.— Metall, 1961, 15, N 15, S. 34.
936. 4.1 *Sample H. H., Neuringer J. L., Rudin L. G.* A review of the effects of high magnetic fields on low temperature thermometers: Low Temp. Phys. vol. 1, New York: Plenum, 1974, p. 601—606.
937. 3.5; 1.4 *Sato A., Hashiba K., Hasatani M. et al.* A correctional calculation method for thermocouple measurements of temperatures in flames.— Combust. and Flame, 1975, 24, N 1, p. 35—41.
938. 2.2 *Schley U.* Fortschritte auf dem Gebiet der Temperaturmessung.— PTB—MITT, 1979, 89, N 1, S. 13—21.
939. 4.1 *Schooly J. F., Soulen R. J. Jr.* Superconductive fixed point for cryogenic thermometry.— Instrum. Technol., 1974, 21, N 11, p. 35—39.
940. 3.5 *Schmidt D. W.* Measurement of temperature in fast flowing air streams.— Gold Bull., 1974, 7, N 4, p. 103.
941. 7.0 *Seifert P., Deutschmann L. S.* Dioden als Temperaturfühler zur Messung tiefer Temperaturen.— Feingerätetechnik, 1979, 28, N 7, S. 311.
942. 1.1 *Seifert P.* Stand der Darstellung der internationalen praktischen Temperaturskala von 1968, im DAMW.— Ibid., 1972, 21, N 3, S. 102—103.
943. 6.0; 4.1 *Seki M., Sakokawa K.* Characteristics of germanium thin film thermometers for use at low temperatures.— Cryogenics, 1982, 22, N 3, p. 121—125.
944. 2.2 *Sekido Satoshi.* Temperature and thermal sensors and their applications.— Nat. Techn. Rept., 1976, 22, N 6, p. 870—884.

945. 6.0 *Selman G. L., Rushforth R.* The stability of metal sheathed platinum thermocouples.— *Platinum Metals Rev.*, 1971, 15, N 13, p. 82.
946. 3.3; 9.0 *Seumel G., Mester U.* Bestimmung und Regelung der Temperatur von Metallbändern mit einem strahlung Pyrometer.— *Metall*, 1972, 26, N 1, S. 245—250.
947. 1.4 *Singh B. S., Dybbs A.* Error in temperature measurements due to conduction along the sensor leads.— *Trans. ASME*, 1976, 98, N 3, p. 491—495.
948. 3.6 *Smith C.* Advances in liquid steel temperature measurement.— *Meas. and Contr.*, 1978, 11, N 3, p. 84—86.
949. 1.3 *Sostman H. E.* Sealed metal — freezing — point cell for thermometer calibration.— *Rev. Sci. Instrum.*, 1977, 48, N10, p. 1351—1353.
950. 4.1; 2.2 *Sparks L. L., Powell R. L., Hall W. J.* Cryogenic thermocouple tables.— *Natl. Bur. Std.*, 1968, 1, N 13, p. 9712.
951. 10.9 *Spezial* — Bimetall — Zeigerthermometer. — *Industrie Anzeiger*, 1975, 97, N 30, S. 607.
952. 3.3; 10.6 *Stephens C. E., Sinnadurai F. N.* A surface temperature limit detector using nematic liquid crystals with an application to microcircuits.— *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 1974, 7, N 8, p. 641—643.
953. 10.5 *Stickstoffthermometers* gaan kwikthermometers vervangen.— *Techn. Rev.*, 1976, 4, N 2, p. 11.
954. 3.6 *Svoboda J.* Pomocne overovani radiacnich snimacu prostrednictvim referencniko zdroje tepelneho zarení.— *Stroj i renvi*, 1977, 27, N 9, p. 563—564.
955. 4.1 *Swartz J. M., Swartz D. L.* Cryogenic temperature sensors.— *Instrum. Technol.*, 1974, 21, N 1, p. 33—38.
956. 1.3 *Swartz D. L., Swartz J. M.* Calibration of cryogenic temperature sensing elements.— *Adv. Instrum.*, 1976, 31, pt. 2, p. 611/1—611/5.
957. 3.1; 3.8 *Szafek B. Z.* Metoda pomiaru szybkozmiennych rozkladow temperatury plomienia w silniku za zaplonem iskrowym.— *Pomiary. Automat. Kontr.*, 1976, 22, N 12, p. 424—425.
958. 4.1 *Szofran F. R., Seidel G. A.* A hyperfine thermometer for use at low temperature : — *Low Temp. Phys.* vol. 1, New York : Plenum, 1974, p. 508—512.
959. 5.0 *Tavener J. P.* Detectores de temperatura de resistencia de platino. Estado de la Técnica.— *Regul. y mundo autom.*, 1979, 12, N 91, p. 45—48, 50.
960. 5.0 *Tavener J. P.* Platinwiderstandstemperaturfühler — Stand der Technik.— *Konstr. Elem. Meth.*, 1979, 16, N 11, S. 59—62.
961. 10.6 *Temperaturmesser* mit Flüssigkristallanzeige.— *Chem. Technol.*, 1977, 6, N 2, S. 60.
962. 3.8 *Temperaturmess* — und Meldeeinrichtung für Radsatzlager von Jaeger.— *Verkehr und Techn.*, 1974, 27, N 8, S. 309—310.
963. 4.2 *Temperaturmessung* bis 2200 Grad.— *Contin Stahlmarkt*, 1978, 28, N 1, S. 53.
964. 4.0 *Temperaturmessung* bei Extremen Bedingungen.— *Technika*, 1975, 24, N 9, S. 699.
965. 3.0 *Temperaturmessung* Fester und Flüssiger Körper.— *Betriebssausrüstung*, 1973, 21, N 9, S. 49.
966. 5.0; 6.0 *Temperaturmessung* mit Thermoelmenten und Platin — Widerstandsthermometern. T. 1. Thermoelmente.— *Ind. Elek.+ Elektron.*, 1978, 23, N 8, S. 176—180.

967. 3.8 *Temperaturmessung mit Berührungsloser Messwertübertragung.*— Chem. Prod., 1979, 8, N 5, S. 30—31.
968. 10.6 *Temperaturen Einfach Ermittelt.*— Electronik-praxis, 1977, 12, N 5, S. 119.
969. 6.0; 4.2 *Thermocouples for high temperatures.*— Instrum. and Contr. Syst., 1962, 11, N 5, p. 105.
970. 6.0 *Thermocouple type selection to suit the application.*— Contr. and Instrum., 1978, 10, N 8, p. 31.
971. 6.0 *Thermocouple thermometers.*— Cryog. Inform. Rept., 1977, 15, N 2, p. 14.
972. 3.0 *Thermometre pour grande profondeur.*— Pêche mar., 1977, 56, N 1195, p. 612.
973. 3.7; 9.0 *Thies G. Messung der manteltemperatur am Zementdrehrohr mit einem längs des Drehrohres Bewegten Ardonox.*— Siemens-Z., 1966, 36, N 12, S. 879—880.
974. 3.6 *Tingwaldt C. Ein einfaches optisches Verfahren zur direkten Ermittlung wahrer Temperaturen glühender Metalle.*— Z. Metallkunde, 1960, 51, N 2, S. 116—119.
975. 9.0; 3.6 *Tingwaldt C., Schley U. Eine optische Methode zur direkten Ermittlung der wahren Temperatur glühender Metalle.*— Z. Instr., 1961, 69, N 7, S. 205—207.
976. 9.0 *Tingwaldt C., Kunz H. Über die Verwirklichung des schwarzen Körpers am Gold — und am Silberpunkt bei Pyrometrischen Temperaturmessungen.*— Optik, 1958, 15, N 3, S. 333—342.
977. 9.4 *Tragbares Präzisions — Infrarotthermometer.*— Schweiz. Maschinenmarkt, 1973, 73, N 49, S. 85.
978. 9.2 *Traverse J. P., Badie J. M. Mesure des températures par pyrométrie optique à l'aide d'un rayonnement laser.*— Rew. prat. contr. ind., 1976, 15, N 79, p. 9—14.
979. 3.3; 6.0 *Uhlmann R., Rink E. Thermoelementsonde für Temperaturmessungen an Metichipbausteinen.* — Feingerätechnik, 1977, 26, N 17, S. 305—307.
980. 2.2; 9.0 *Ullrich O. A. Photographic Pyrometry — Methods merits and Applications.*— J. Appl. Photogr. Eng., 1979, 5, N 1, p. 1—17.
981. 10.8 *Utton D. B., Vanier J. Thermometry by nuclear quadrupole resonance.*— Instrum. Technol., 1976, 23, N 12, p. 47—52.
982. 6.0 *Vanvor H. Stand und Entwicklungstendenzen der Temperaturmessung, mit Thermoelementen.*— In: Technische Temperatur — messung. Dusseldorf, 1973, S. 81—91 (VDI — Berichte; N 198).
983. 10.3 *Veprek J. Feritowy teplomer pro rozsah teplot 77 oz 303 K.*— Slaboproudý obz., 1973, 36, N 1, p. 16—20.
984. 9.4 *Verberkmoes L. T. G. Contactloos Meten met Infraroot Thermometers.*— Automatie, 1975, 10, N 3, p. 17.
985. 7.0 *Verbesserte Temperaturmessgeräte mit Thermistorfühler.*— Elektriker, 1975, 14, N 1, S. 24.
986. 11.0 *Volker G. Digital Anzeigendes PräzisionsThermometer.*— Electronik, 1977, 26, N 5, S. 61—64.
987. 10.5 *Vraag naar veilige thermometers neemt toe.*— Techn. Rev., 1976, 4, N 7, p. 11.
988. 4.2 *Walch H. Hochtemperaturhalbleiter. Ein Neuer Fühler für Temperaturen bis 1000 °C.*— Bauteile Rept, 1978, 5, N 6, S. 208—210.

989. 4.1; 1.4 *Warszawsky I.* Heat conduction errors and time lag in cryogenic thermometer installations.— *ISA Trans.*, 1974, 13, N 4, p. 335—346.
990. 10.3; 10.4 *Webb R. A., Giffard R. P., Wheatley J. C.* Relationship between noise temperatures and powdered CMN magnetic temperatures: application to the properties of ^3He .— *Low. Temp. Phys.* vol. 1, New York : Plenum, 1974, p. 517—521.
991. 2.1 *Weber R. T. L.* Heat and temperature measurement.— New York : Weber, 1950, vol. 10.— 422 p.
992. 4.2; 9.0 *Weiss M.* High temperature ultraviolet radiometer.— *Instrum and Contr. Syst.*, 1964, 37, N 5, p. 95—99.
993. 9.4; 3.8 *Wiederhold P. R.* Infrared pyrometer for temperature monitoring of train wheels and jet engine rotors.— *Mater. Eval.*, 1974, 32, N 11, p. 239—243, 248.
994. 3.2; 5.0 *Wisniewski S.* Ocena dynamicznych własności powleczchniowych termometrów oporowych.— *Arch. bud. masz.*, 1973, 20, N 4, p. 607—618.
995. 2.2; 4.1 *Wheatley J. C.* New techniques in refrigeration and thermometry.— *Low. Temp. Phys.* vol. 1, New York : Plenum, 1974, p. 455—464.
996. 9.0 *Wormser E. M.* Radiation thermometer with in — line blackbody reference.— *Instrum. and Contr. Syst.*, 1964, 12, N 4, p. 101—104.
997. 9.4 *Young R. S.* A new infrared radiation pyrometer.— *J. Sci. Instrum.*, 1967, 14, N 3, p. 988—992.
998. 7.0; 1.3 *Zakrzewski J.* Einpunktkorrektur an Thermistor — Thermometern beim Austausch von Heissleitern.— *Techn. Mess. atm.*, 1978, 45, N 2, S. 57—60.
999. 10.4. *Zrubek V., Staricek I.* Symovy teplomer so supravodivym kvantovym magnetometrom.— *Cs. cas. fuz. A*, 1978, 28, N 6, p. 587—594.
1000. 9.4 *Zweifarben — Infrarot — Temperaturmessgerät.* — Aluminium (BRD), 1977, 53, N 5, S. 330.
1001. 1.1 *Zweite Internationale Konferenz über Temperaturmessung in Prag.* — *PTB — Mitt.*, 1979, 89, N 3, S. 190—191.

ДОПОЛНЕНИЕ

1. 4.1 *Балаков В. В., Преображенский Р. К., Цицар Н. Ф.* Измерение коэффициентов теплопроводности в области температур 30—300 К.— *Оптико-мех. пром-сть*, 1982, № 12, с. 43—44.
2. 1.4 *Белоусов И. А., Саченко А. А., Григорьева Л. А.* Схема коррекции погрешностей первичных измерительных преобразователей.— В кн.: Датчики на основе технологической микроэлектроники : Материалы семинара. М., 1983, с. 172—174.
3. 1.4 *Болдырева Г. П. и др.* О температурной компенсации в термоанемометре.— *Изв. вузов. Приборостроение*, 1973, № 7, с. 38—65.
4. 3.1 *Болдырева Г. П., Пальтов И. П.* Структурная схема и передаточные функции термоанемометра постоянной температуры.— Там же, № 2, с. 66—88.
5. 3.8; 9.0 *Васильцев Г. В., Заяц И. В., Ким Р. Б., Самченко Г. П.* Пирометрический преобразователь температуры лопаток

- газотурбинного двигателя и особенности его метрологического обеспечения.— КИТ, 1983, № 33, с. 77—84.
6. 1.4; Вафин Р. А. Погрешность измерения температуры термоэлектрическими термометрами в магнитном поле.— Измер. техника, 1982, № 10, с. 40—41.
 7. 2.0 Галюк О. С. и др. Измерительные ячейки для калориметров Кальве.— ПТЭ, 1973, № 6, с. 179—182.
 8. 9.0; Гаркавый Е. В., Павловский А. К. Регистрация мощного лучистого теплового потока датчиком-радиометром.— Там же, с. 67—77.
 9. 9.0; Гаркавый Е. В., Павловский А. К. Измерение лучистых тепловых потоков.— В кн.: Тепло- и массоперенос при высоких температурах. Минск, 1973, с. 78—100.
 10. 2.0 Гасанов А. С., Бабаков О. В., Банников А. И. А.с. 991187 (СССР). Устройство для измерения температуры.— Оубл. в Б.И., 1983, № 3.
 11. 6.0; Гасанов А. С., Мешков Ю. В., Карабейский М. Д. Способ компенсации температуры холодного спая термопары.— Пром. теплотехника, 1983, 5, № 2, 87—91.
 12. 10.4 Гришко В. Ф. А.с. 966506 (СССР). Шумовой термометр.— Оубл. в Б.И., 1982, № 38.
 13. 9.0 Дукарский С. М. и др. Об одном методе измерения истинной температуры тела по его собственному излучению.— ТВТ, 1973, № 6, с. 1245—1249.
 14. 1.1; Жагулло О. М. Сходимость температурных шкал стран- ченов СЭВ в диапазоне 1064,43—2000 °С по результатам круговых сличений 1980—1981 гг.— В кн.: Исследования в области контактной термометрии и пирометрии излуче- ния. Л., 1982, с. 36—45.
 15. 3.3 Заикин С. И., Михенцев Р. М. А.с. 958872 (СССР). Уст- ройство для измерения температуры поверхности.— Оубл. в Б.И., 1982, № 34.
 16. 10.5 Захарченко Н. Е., Грищенко А. З., Бондарь Б. П., Чи- женко П. В. А.с. 934250 (СССР). Манометрический термо- метр.— Оубл. в Б.И., 1982, № 21.
 17. 3.8 Зеленый А. И., Шендерович И. М. Об измерении темпера- туры в замкнутых объемах.— Тр. НИИ приборостроения, 1983, № 43, с. 57—59.
 18. 7.0; Зиновьева К. Н., Вайнберг В. В., Воробкало В. М. и др. 4.1 Германиевые термометры сопротивления для сверхниз- ких температур.— ПТЭ, 1982, № 5, с. 198—200.
 19. 2.0 Зорий В. И. А.с. 903714 (СССР). Устройство для измере- ния температуры.— Оубл. в Б.И., 1982, № 5.
 20. 2.0 Изотермический калориметр для титрования.— Приборы для науч. исслед., 1973, № 4, с. 122—125.
 21. 4.0; К вопросу об измерении распределения температуры в по- граничном слое на стенках канала МГД-генератора откры- того цикла.— ТВТ, 1973, № 6, с. 1314—1315.
 22. 4.2; Кац С. М., Богин В. Н., Чубенко Н. Г. и др. А.с. 1000784 6.0 (СССР). Высокотемпературная термопара и способ ее изготовления.— Оубл. в Б.И., 1983, № 8.
 23. 2.0 Колодий З. А., Манченко А. В., Стадник Б. И. А.с. 917002 (СССР). Устройство для измерения температуры.— Оубл. в Б.И., 1982, № 12.
 24. 3.3 Колтунов Я. И., Ноженко А. П. А.с. 964479 (СССР). Устройство для измерения температуры поверхности упругого тела.— Оубл. в Б.И., 1982, № 37.

25. 4.2 *Кондрашов А. В., Соколов А. Н.* Высокотемпературный максимальный термометр.— ПСУ, 1982, № 11, с. 29—30.
26. 9.0 *Корнилов С. Г.* А.с. 867135 (СССР). Тепловой приемник излучения.— Оpubл. в Б.И., 1982, № 14.
27. 1.4; 6.0; 4.2 *Кривцов В. А.* Стабильность микротермопар в интервале температур 400—1200 К.— Теплоэнергетика, 1973, № 10, с. 73—76.
28. 4.1 *Криогенные средства измерения.*— В кн.: Исследования процессов в установках и системах криогенного машиностроения. Балашиха (Московск. обл.), 1982, с. 98—112.
29. 4.2 *Куритный И. П., Стадник Б. И., Гамула П. Р., Денко И. П.* А.с. 945680 (СССР). Термопреобразователь высокотемпературный.— Оpubл. в Б.И., 1982, № 27.
30. 6.0 *Куритный И. П., Стадник Б. И., Лах В. И. и др.* А.с. 892235 (СССР). Термопреобразователь.— Оpubл. в Б.И., 1981, № 47.
31. 3.5; 4.2 *Лавров Б. П., Тютчев М. В.* Измерение газовой температуры плазмы капиллярно-дуговых спектральных ламп.— Оптико-мех. пром-сть, 1982, № 12, с. 11—13.
32. 9.0 *Ландкоф В. Н.* Оптический пирометр.— Техн. эстетика, 1982, № 12, с. 14—15.
33. 5.0; 1.0 *Лах В. И., Лах О. И., Хохлова Л. С.* О международной стандартизации термопреобразователей сопротивления.— КИТ, 1983, № 33, с. 64—69.
34. 6.0 1.4 *Лах В. И., Хохлова Л. С.* Анализ номинальных статических характеристик и допускаемых отклонений термоЭДС преобразователей, выпускаемых в СССР и за рубежом.— Там же, с. 73—77.
35. 10.0 *Ляковский И. И., Биленко Д. И.* Локальное определение температур в полупроводниковых материалах интерференционным методом.— В кн.: Создание и расчет электронных устройств и приборов. Саратов, 1982, с. 31—34.
36. 2.0 *Методы обработки результатов наблюдений при нуизмерениях ВНИИМ.*— Тр. метролог. ин-тов СССР/ВНИИМ, 1975, вып. 172, с. 3—58.
37. 2.0 *Мишченко В. Ю., Кочан В. В., Востриков В. Н.* А.с. 953470 (СССР). Устройство для измерения температуры.— Оpubл. в Б.И., 1982, № 31.
38. 2.0 *Мусиевская М. А.* Тепловые расходомеры с постоянной мощностью нагрева.— Измер. техника, 1973, № 10, с. 88—90.
39. 1.0 *Олейник Б. Н.* Фундаментальные метрологические исследования в области термометрии.— В кн.: Исследования в области контактной термометрии и пирометрии излучения. Л., 1982, с. 3—6.
40. 10.4 *Олейник Б. Н., Соколов Н. А., Лихачев В. Г.* А.с. 987418 (СССР). Шумовой термометр.— Оpubл. в Б.И., 1983, № 1.
41. 3.8 *Отэ Акира.* Пат. 57-17448 (Япония). К.к.Йокогава дэнки сэйсакусё. Термометр для измерения температуры поверхности тел.— Оpubл. 10.04.82.
42. 9.0 *Петров В. А.* Бесконтактное измерение температуры полупрозрачных материалов.— Измерения, контроль, автоматизация, 1983, № 1/45, с. 14—21.
43. 4.1; 3.1 *Пилипенко Н. В., Ключев В. М.* Методы и устройства нестационарной теплотометрии при криогенных температурах.— Изв. вузов. Приборостроение, 1983, 26, № 5, с. 88—92.

44. 9.0 *Поварков В. И., Иванов Н. Е., Кабанин В. Ф. и др.* Радиометр для измерения температуры водной поверхности.— Опτικο-мех. пром-сть, 1983, № 4, с. 32—33.
45. 2.0 *Поздняков Ю. В., Саченко А. А., Шваенко М. А. А.с. 97226 (СССР).* Устройство для измерения температуры.— Оубл. в Б.И., 1982, № 41.
46. 7.0 *Полупроводниковый терморегулятор.*— Бюл. техн. экон. информ., 1973, № 10, с. 51—52.
47. 6.0 *Попов В. П., Маренич И. Г., Шкутов Л. В., Цимбал Н. С. А.с. 832355 (СССР).* Термочувствительный элемент.— Оубл. в Б.И., 1981, № 19.
48. 3.5; 4.2 *Рекин А. Д.* Калориметрический приемник для непрерывного измерения энтальпии высокотемпературного потока газа.— ТВТ, 1973, № 6, с. 1318—1320.
49. 4.2; 3.5 *Роскошный В. Г.* Устройство для измерения температуры высокотемпературных газоразрядных источников нагрева.— ПТЭ, 1973, № 6, с. 145—147.
50. 1.3; 5.0 *Савостенко П. И., Сербин С. П.* Статическая градуировка прецизионного термометра сопротивления.— В кн.: Тр. Донец. ун-та, 1983, с. 7.
51. 5.0 *Сакчетти Петер Дж.* Логометрический датчик температуры.— В кн.: Автомобильные датчики. М., 1982, с. 79—80.
52. 3.4 *Самарцев С. Б., Геращенко В. В.* Методика синтеза измерительной системы для безынерционного замера температуры во фрикционных элементах.— Изв. вузов. Машиностроение, 1983, № 4, с. 158—160.
53. 3.4 *Самойленко А. Ю., Шишкин В. А. А.с. 998875 (СССР).* Устройство для измерения температуры подвижного объекта.— Оубл. в Б.И., 1983, № 7.
54. 2.0 *Сато Сусуму, Сэгава Йосихиро, Ясуда Эцуро, Хаттори Масаси.* Пат. 57-46012 (Япония). Ниппон дзидося бухин сого кэнкюсё. Датчик температуры.— Оубл. 30.09.82.
55. 9.3 *Свет Д. Я., Краюшкин С. В., Парфинович А. Ф. и др. А.с. 692341 (СССР).* Пирометр цветовой температуры.— Оубл. в Б.И., 1982, № 10.
56. 3.7 *Симокура Ясухито, Кусима Юкимаса, Арино Тосисукэ.* Пат. 57-3896 (Япония). Синниппон сэйтэцу к.к. Способ измерения температуры в печи.— Оубл. 23.01.82.
57. 6.0; 4.1 *Спаркс Л. Л., Пауэл Р. Л., Дж. Холл В.* Достижения в области измерения низких температур с помощью термопар.— В кн.: Механические свойства конструкционных материалов при низких температурах. М., 1983, с. 392—398.
58. 6.0; 2.1 *Стадник Б. И.* Пути развития термоэлектрических преобразователей.— КИТ, 1983, № 33, с. 58—63.
59. 3.4 *Тимофеев Н. К., Федоров Ю. А.* Об измерении температуры подвижных нагревательных элементов.— Автоматиз. произв. процессов текстильн. и легк. пром-сти, 1982. Вып. 5, с. 24—28.
60. 1.4; 4.1 *Товма А. А.* Оценка качества контакта низкотемпературного термометра с исследуемым объектом.— Пром. теплотехника, 1983, 5, № 2, с. 85—87.
61. 10.0 *Тунян О. А., Никогосян Г. Н., Мелконян Л. Ш., Месропян Г. Г. А.с. 901840 (СССР).* Пневматическое устройство для измерения температуры.— Оубл. в Б.И., 1982, № 4.

62. 3.5 *Удовенко В. М.* А.с. 964481 (СССР). Устройство для измерения температуры газового потока.— Оpubл. в Б.И., 1982, № 37.
63. 10.5 *Хлудеев А. Ф.* Манометрические датчики-реле температуры с настраиваемым диапазоном регулируемых температур.— ПСУ, 1982, № 10, с. 34—35.
64. 1.0 *Хохлова Л. С., Лах В. И.* Воздействие стандартизации средств электротермометрии на повышение роста эффективности производства.— Стандарты и качество, 1983, № 5, с. 29—31, 76, 79.
65. 10.0 *Царев А. В., Колосовский Е. А., Петров Д. В.* А.с. 932285 (СССР). Устройство для измерения температуры.— Оpubл. в Б.И., 1982, № 20.
66. 2.0; 9.0 *Чистяков В. А.* О возможностях метода многоцветовой пирометрии.— В кн.: Исследования в области контактной термометрии и пирометрии излучения. Л., 1982, с. 33—36.
67. 1.4 *Ярышев Н. А., Столяров А. С.* Тепловой режим элемента оптической системы.— Изв. вузов. Приборостроение, 1973, № 11, с. 114—119.
68. 1.4 *Ярышев Н. А., Уточкин С. В.* Влияние теплоотвода на динамические свойства дискового теплопреобразователя.— КИТ, 1983, № 33, с. 98—101.
69. 4.1; 10.8 *Aalto M. I.* NMR thermometry at millikelvin temperatures.— (Helsinki Univ. Technol. Dep. Technic. Phys. Otaniemi, Finland). Helsinki, 1973.
70. 3.5; 10.0 *Alden M., Grafström P., Lundberg H., Svanberg S.* Spatially resolved temperature measurements in a flame using laser-excited two-line atomic fluorescence and diode-array detection.— Opt. lett., 1983, 8, N 5, p. 241—243.
71. 3.3 *Anderson H. V.* Пат. 4321827 (США). Self aligning surface temperature sensor.— Оpubл. 30.03.82.
72. 3.4 *Andrașcîk Ondrej, Mătișin Miculăș.* А.с. 190262 (ЧССР). Snimač pre meranie Tteploty sypkých a tekutých látok.— Оpubл. 15.10.81.
73. 4.2 *Aparatura do pomiaru wysokich temperatur.*— Buil. techn. inf. Mera, 1983, № 2, p. 8—12.
74. 6.0 *Asavinei I., Niculescu C.* Chid pentry utilizarea termocuplyrilor in măsurări industriale.— Tehnică, Bucuresti, 1981.— p. 222.
75. 10.9 *Ashcroft.* Les Thermomètres bimétalliques Ashcroft desormais fabriques en Allemagne occidentale.— Inter. TECNIC, 1977.— p. 226.
76. 3.4 *Balzer N.-Ü., Marzok Ü., „Jahr W.* Пат. 155927 (ГДР). Kapazitive Messung der Öltemperaturteilung in Gleitadern.— Оpubл. 14.07.82.
77. 3.5; 4.0 *Baker D. R., Lee Shu-Tso.* Dual laser interferometer for plasma measurements on large tokamaks.— Rev. Sci. Instrum., 1978, 49, № 7, p. 919—922.
78. 1.4; 3.3 *Barzantny J., Rainer H.* Fehlerfrüherkennung an mineralstoffisolierten Mantelthermoelementen und Mantelmessleitern.— Techn. Mess. atm., 1979, 46, N 6, p. 239—240.
79. 1.4 *Bckursdorf K., Sadovski J.* Methode zur Bestimmung der Meßfehler von Thermometern durch Wärmeableitung des Schutzrohres.— In: XXVII Int. Wiss. Kolloq., Ilmenau, 25—29 Oct., 1982. Helt 4. Vortagsr. A3, A4. Ilmenau, s. a., S. 71—74.

80. 1.1 *Bekanntmachung* über Temperaturskalen.— PTB Mitt, 1977, 87, N 6, S. 497.
81. 4.1; 5.0 *Besley L., Kemp R. C.* The use of industrial-grade platinum resistance thermometers between 77 K and 273 K.— Cryogenics, 1983, 23, N 1, p. 26—28.
82. 10.9 *Bimetall-Kontaktzeiger Thermometer*.— Technica, 1977, 26, N 23, S. 1835.
83. 2.1; 2.2 *Bjorklöf D.* Temperatur matnirig-teori och praletik.— Kem. tidskr., 1978, 90, N 7, S. 27—33.
84. 11.0 *Bojkowski J., Janiczek J., Jellonek K.* Cyfrowy system pomiaru temperatury.— Pomiar, Automat., Kontr., 1978, 24, N 4, p. 142—143.
85. 3.3; 3.6 *Böttcher W., Kopineck H. J., Tappe W.* Infrarot STR Strahlungsmessung Oberflächentemperatur von Stahl.— 9.4 Stahl und Eisen, 1977, 97, N 10, S. 513—521.
86. 10.4 *Brixly von Heinz, Oehmen J., Rittinghaus K. F., Wegener H. P.* Rauschthermometrie. I.— Techn. Mess. atm., 1978, 45, N 10, S. 351—354.
87. 10.4 *Brixly H., Rittinghaus K. F.* Rauschthermometrie—ein genaues Temperaturmessverfahren.— Electrotechnik, 1977, 59, N 18, S. 20—22, 24—26.
88. 10.4 *Brixly H., Rittinghaus K. F.* Rauschthermometrie—ein neuartiges Temperaturmessverfahren.— Elek. Ausrüst., 1977, 18, N 6, S. 15—16, 19—20.
89. 6.0 *Brookes C.* Nicrosil-nisil a high stability nikelbased thermocouple to replace type.— Meas. and Contr., 1982, 15, N 10, p. 369—370.
90. 5.0 *Capteurs industriels à résistance thermométrique de platine*.— Publ. CEI, 1983, N 751, p. 39.
91. 7.0; 11.0 *Chosh Susamanja.* Digital temperature recorder by electronic circuit controlled measuring device using silicon diode gas temperature sensor.— Elec. India, 1982, 22, N 20, p. 9—12.
92. 4.2 *Colclough A. R.* Methods of practical thermometry in the range 0 to 3000 °C survey.— Meas. High Temp. Mech. Prop. Mater. Proc. Symp., Teddington, 3—5 June, 1982, p. 58—90.
93. 2.0; 3.0 *Davis Bayard C., Heyden Donald H.* Пат. 43241338 (США). Method of and apparatus and system and for determining temperature conditions.— Опыл. 13.04.82.
94. 9.0 *Desvignes F.* Prèsetation d'un pyromètre optique automatique monochromatique à l'usage industriel.— Rev. prat. contr. ind., 1976, 15, № 79, p. 23—27.
95. 11.0 *Digitale Temperature-Messung-Schweiz*.— Ind. und Verkehrsrev., 1973, 45, S. 41.
96. 10.3 *Différences* entre les échelles magnétiques de température entre 1 K et 30 K.— XI Sess. com. consult. Thermom. Com. int. poids. et mes., 1976, Paris, 1977, p. 133—135.
97. 1.1; 4.1 *Durieux M., Astrov D., Kemp W. R. G., Swenson C. A.* The derivation and development of the 1976 provisional 0,5 K to 30 K temperature scale.— Metrologia, 1979, 15, N 2, p. 57—63.
98. 1.4; 5.0 *Eggers H. R.* Zuleitungseinfluss bei widerstandsthermometern und seine Beeseitigung durch Sechseckbrücke.— Messen und Prüfen, 1978, N 4, S. 185—188.

99. 4.1; 7.0 *Eska G., Neumater K.* A carbon resistance thermometer with fast response below 10 mK.— *Cryogenics*, 1983, 23, N 2, p. 967—968.
100. 4.2; 5.0 *Evans J. P.* Travaux en cours au NBS sur les thermomètres à résistance aux températures élevées.— XI Sess. Com. consult. thermoin. Com. int. poids et mes., 1976, Paris, 1977, p. 167—172.
101. 3.3; 4.1; 9.0 *Fischer H.* Ein kombiniertes Strahlungs und Berührungsthermometer für niedere Temperaturen. I.— Messen und Prüfen, 1977, N 78, S. 435—441.
102. 3.3 *Fricke J., Noack G., Spiegel K.* Messungen an geschliffenen Gleitflächen. Teil 5. Temperaturmessungen.— Messen und Prüfen, 1979, N 7—8, S. 567—570, 573.
103. 1.1; 2.0 *Hansen H.* Warum stimmt die thermodynamische Temperaturskala mit..., 1977, 87, N 2, S. 97—102.
104. 6.0 *Heddergott A.* Пат. 0152992 (ГДР). Meßschaltung mit Thermoelementen, insbesondere zur Messung von Differenztemperaturen.— *Onyбл.* 16.12.80.
105. 6.0 *Helms A. J.* Temperature measurement by thermocouples.— *Automation*, 1976, 11, N 11—12, p. 23—25, 27.
106. 3.2 *Heuvel J.* Temps de réponse des détecteurs de température. Méthodes de mesures.— *Bull. inform. Bur. nat. métrol.*, 1978, 9, N 32—33, 34—40.
107. 6.0 *Hobson John W.* The introduction of the microil/nisil thermocouples in australia.— *Austral. J. Instrum. and Contr.* 1982, 38, N 5, p. 102—104.
108. 10.0 *Hog G. R., Ulin R. A., Polac R. B.* Пат. 4345470 (США). All plastic disposable thermometer.— *Onyбл.* 24.08.82.
109. 4.1 *Ichikawa K., Fujioka K., Kodama T.* et al. A glass capacitance thermometer for use at mK temperature range.— *Proc. 9 Int. Cryog. Eng. Conf.*, Kobe, 11—12 May, 1982. Guilford, 1982, p. 590—592.
110. 1.4; 6.0 *Inglis B. D.* An absolute method for the determination of ac-dc transfer errors in thermoelements.— *Conf. Precis. Electromagn. meas.*, New York, 1978.
111. 3.5 *Joklik R. G., Daily J. W.* Two atomic fluorescence temperature measurements in flames: an experimental study.— *Appl. Opt.*, 1982, 21, N 22, p. 4158—4162.
112. 5.0 *Jovanović D.* Pretvaranje otpornosti u napon primenjeno kod električnih otpor nih termometara.— *Tehnika*, 1982, 37, N 11, s. 1731—1733.
113. 3.5 *Kayukawa N., Aoki Y., Ozawa Y.* Application of light polarization technique to the generalized line-reversal method for gaseous temperature measurements.— *Rev. Sci. Instrument.*, 1982, 53, N 11, p. 1653—1655.
114. 9.0 *Kirsch N.* Unter extremen Bedingungen berührunglos messen mit Strahlungsthermometern.— *Maschinenmark*, 1982, 88, Nr. 99, S. 2111—2113.
115. 2.2 *Knight R. B. D.* A differential thermometer with 0.0001° resolution.— *CPIM 74, Dig. Conf. Precis. Electromagn. Meas.* (London, 1974). New York, 1974, p. 35—37.
116. 2.2 *Krigman A.* Guide to selecting non-contact temperature instrumentation.— *I. Tech.*, 1983, 30, N 6, p. 23—28.
117. 9.4 *Kupoi Tsuneo.* Кэйсоку гидзюцу.— *Instrum. and Automat.*, 1977, 5, N 11, p. 97—100.

118. 3.0 *Leclerc D., Thery P.* Apparatus for simultaneous temperature and heat-flow measurements under transient conditions.— *Rev. Sci. Instrum.*, 1983, 54, N 3, p. 374—380.
119. 6.0 *Les Thermocouples D. M.*— *I. équip. élec. et électron.*, 1977, N 396, p. 43—45.
120. 9.4 *Malitzki H.* Infrarotthermometrie Messeinrichtungen: Strahlungs-pyrometrie — Infrarotfernschau — Thermovision.— *Bild und Ton*, 1978, 31, N 2, S. 45—51.
121. 2.0; 10.2 *Mangym B. W.* Mercury thermometers—are they becoming antiques? — *Monit. Proc. IREE Austral.*, 1977, 38, N 5, p. 106—108.
122. 1.1 *McAllan J. V.* Fractical reference temperatures using melting point techniques.— *J. Phys. E Sci. Instrum.*, 1982, 15, N 2, p. 884—885.
123. 6.0 *Messung der Temperatur mit Thermoelementen. Wirkungswiese—Einbau—Neuerungen.*— *Kunstst. J.*, 1976, 10, N 11, 12, 14, 35.
124. 9.4 *Mesure de température des plastiques par infrarouge.*— *Ofic plast. et caoutch.*, 1977, 24, N 254, p. 558.
125. 11.0 *Metratherm 1200 d-Ein nieuwedigtales aan-wijzende temperatuurmeter.*— *Meded Brown Boveri Ned.*, 1977, 43, s. 3.
126. 3.5; 9.3 *Tieffe-Prevost P.* Analyse spectroscopique appliquée à la mesure de la température dans les plasmas.— *Bull. inform. Bur. nat. métrol.*, 1978, 9, N 32—33, p. 28—33.
127. 1.4; 9.3 *Terpilowski J.* Wplyw uchybow fluktuacyjnych fotodetektorow na blad pomiaru szybkozmiennych temperatur metodami pirometrii nielobarwowey.— *Biul. WAT J. Dabrowskiego*, 1977, 26, N 6, p. 67—78.
128. 3.5 *Terpilowski J., Wisniewski S.* Experymentalne okreslenie stalch czasowych termoelementow pryznaczonych do pomiaru temperatury goracych gasow.— *Pr. nauk. Inst. techn. cieplni mech. plynow PWR*, 1977, N 20, p. 110—114.
129. 5.0 *Trietly H. L.* Pat. 4311981 (CIIA). Trimmable wirewound resistance temperature transducer.— *Onybl.* 19.01.82.
130. 1.4 *Trietly H. L.* Pitfalls which are often overlooked in PRT temperature measurements.— *Adv. Instrum.*, vol. 36. *Proc. ISA Conf. and Exhib.*, Anaheim, Calif., Oct. 6—8, 1981, Pt. 2, Research, Triangle Park, N. C. 1981, p. 657—665.
131. 3.5 *Uszaruk A.* Nowy czujnik do pomiaru temperatur w układzie przeplywowym wentylatorow. Wentylatory przemyslowe.— 2. *Konf. nauk.-techn.*, Jaszowill, 23—31 marca 1979, *Zesz. nauk. PSI*, 1979, N 604, p. 167—173.
132. 9.4 *Vanzetti R., Intrieri A.* Fiber-optic infrared systems control thermal industrial processes.— *Proc. IFAC 6th World Congr.* Boston, Mass., 1975, Pt. 4, Pittsburgh, 1975, 56, p. 1—56.
133. 3.1; 3.5; 6.0 *Venkatramani N., Satyamrny P., Dixit N. S. et al.* Simplified of high-stream temperature using dynamik thermocouples.— *Inter. J. of Heat and Mass Transfer.*, 1983, vol. 26, N 5, p. 663—669.
134. 3.3; 3.8 *Nagaraj H. S. et al.* Surface temperature measurements in rolling and sliding EHD contacts.— *ASLE 33rd Ann. Meet.*, Dearborn, Mich, 1978, Park Ridge, ill, s.a., p. 1—9.
135. 7.0 *Petrac D.* Germanium resistance thermometers—conditions with affect their precision.— *In Proc. 9 Int. Cryog. Eng. Conf.*, Kobe, 11—14 May, 1982, p. 596—599.

136. 2.2; *Pierce W. G., Bartos D. J.* Sensors for cryogenic thermometry.— I. Tech. 1983, 30, N 7, p. 53—56.
137. 7.0 *Raabe G.* Silizium-Temperatur-Sensoren von -50°C bis $+350^{\circ}\text{C}$. NTG — Fachber., 1982, N 79, S. 248—253.
138. 3.5; *Reif I. G., Tassel V. A., Kniseley R. N.* Spectroscopic flame
9.1; temperature measurements and their physical significance.
9.3 The transition probability problem.— Colloq. Spectroscopic Int. 16. Heidelberg, 1971, p. 317.
139. 3.1; *Rozko M.* Dynamiczne pomiary ustaloch temperatur gasy.—
3.5 Pomiary, automat. kontr., 1982, 28, N 7, s. 204—206.
140. 4.1 *Rubin L. G., Sample H. H.*— Cryogenics, 1982, 22, N 10,
p. 491—503.
141. 3.5; *Sassoon G., Randles A. f.* A 60 GHz radiometer for outside
9.1 air temperature.— Proc. 7th Int. Aerospace Instrum. Symp. (Granfield, 1972), London, 1972, p. 1—5.
142. 10.2 *Schonberger Milton.* Пар. 4317367 (США). Fever Thermometer or the like sensor.— Оpubл. 02.03.82.
143. 2.2; *Stankovic D.* Savremeni poluprovodnicki pretvarači za
7.0 merenje temperature.— Techn. fiz. SFRJ, 1978, 19, p. 47—54.
144. 1.2; *Swenson C. A.* Le thermomètre à gay à volume constant
4.1 comme instrument d'interpolation au dessous de 20 K.— XI Sess. Com. consult. thermom. Com. int. poids et mes., 1976, Paris, 1977, p. 86—88.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютно черное тело** 20
Абсолютный удельный коэффициент термоЭДС 207
Автокорреляционная функция 73
Агрегатный комплекс стандартных пирометрических преобразователей 343
Алмазный термометр 385
Амплитудно-фазовая характеристика 70
Амонтон 11
Амплитудно-частотная характеристика 70
Аппаратура для воспроизведения МПТШ 38
— — экстраполяции МПТШ 44
Аристотель 9
Беккерель 13
Больцмана постоянная 21
Бытовые термометры 102
Вина формула 20, 315
Влияние вибрации на показания ИПТ 80
Воспроизводимость результатов измерения 77
Вторичные реперные точки МПТШ 37
Выбор метода измерения температуры пламени 424
— средства измерения температуры 76
Газовый термометр 17
Газодинамический нагрев ИПТ 65
Галилей 10
Гей-Люссак 12
Гей-Люссака закон 17
Гиппократ 9
Глубоководные термометры 92
Демокрит 9
Депрессия стекол 83
Джозефсона элемент 23
— эффект 23
Динамика измеряемой температуры 77
Динамические характеристики ИПТ 68
Дисперсия 73
Дистанционный капилляр 123
Длительность процесса измерения 77
Допплера эффект 421
— уширение 421
Жидкостно-стеклянные термометры:
Бекмана 90
бытовые 102
высокотемпературные 90
лабораторные 95
максимальные 91
метастатические 89
метеорологические 102
минимальные 92
определение 82
промышленные 101
сельскохозяйственные 102
специальные 101
термоконтракторы 103

- Защита термопар 289
 Защитные оболочки термопар 224
 Зегера конусы 373
 Зеебек 13
 Зеебека эффект 206
 Изготовление термопар 220
 Измерение температуры пламени 412
 Изоляция термопар 224
 Индикаторы температуры 372
 Интегральная излучательная способность материалов 309
 Интенсивность излучения 305
 Исль 12
 Источники методических погрешностей 55
 Каллендер 13
 Карно цикл 16
 Кельвина температура 19
 Кирхгофа закон 304
 Клапейрона уравнение 17
 Конденсационный термометр 38, 123
 Кондо сплавы 225
 Коэффициенты:
 излучательной способности 315
 отражения 307
 поглощения 307
 пропускания 307
 теплового излучения 308
 термоЭДС 207
 Кюри—Вейса закон 22
 Ламберт 11
 Левкипп 9
 Ле-Шателье 13
 Лоренца уширение 421
 Магнуса правило 208
 Манометрические термометры:
 газовые 123, 125, 128
 жидкостные 123, 125, 128
 конденсационные 123, 125, 129
 определение 123
 Математические модели теплообмена 57, 61
 Математическое ожидание 73
 Международная практическая температурная шкала 24
 Метастатические термометры 89
 Метеорологические термометры 102
 Метод абсолютной интенсивности спектральных линий 418
 — асимметричного нагревателя 213
 — двух сред 213
 — захвата 212
 — лучеиспускания и поглощения 417
 — магнитный 214
 — обращения спектральных линий 414
 — относительных интенсивностей спектральных линий (Орнштейна) 420
 — пружинного контакта 209
 — точечной печи 213
 Микропирометр 343
 Модель абсолютного черного тела 42
 Найквиста формула 21
 Нестабильность характеристик термоэлектродов 216
 Нильсен 13
 Номинальная статическая характеристика ТС 183
 Облученные кристаллы 385
 Образцовые средства поверки ТС 180
 Ожидаемые значения измеряемых температур 78
 Ом 13
 Оптическая пирометрия 316
 Пельтье эффект 206
 Передаточная функция ИПТ 57, 58

- Переходная функция 58, 69
- Пирометрические преобразования:
 - без модуляции потока излучения 346
 - с модуляцией потока излучения 346
- Пирометрия:
 - оптическая 316
 - радиационная 315
 - цветовая 320
 - яркостная 316
- Пирометры:
 - оптические 335
 - ОППИР-017 338
 - полного излучения 371
 - прецизионный ЭОП-66 343
 - «Промінь» 340
 - спектрального отношения 371
- Плавкие металлические вставки 372
- Пламя:
 - несветящееся 413
 - определение 412
 - светящееся 413
- Планка закон излучения 20, 315
- постоянная 305
- Поверка ИПТ 49, 177, 302
- Поверочная схема 49
- Погрешность измерения:
 - абсолютная 53
 - динамическая 54
 - инструментальная 54
 - методическая 53, 55, 60, 388
 - определение 53
 - относительная 53
 - приборная 54
 - регистрации наблюдений 54
 - систематическая 54
 - случайная 54, 73
 - статическая 54, 59
- Погрешности манометрических термометров 127
- Позисторы 167
- Пойтинга вектор 305
- Показатель преломления 308
- Поправка на температуру выступающего столбика жидкостно-стеклянного термометра 87
- Поток излучения 306
- Правило аддитивности показаний по материалам 209
- — — по температуре 208
- Пульс 14
- Радиационная температура 308
- Ре 10
- Релаксационная деформация стекол 83
- Ренальдини 11
- Реньо 12
- Реомюр 12
- Реперные точки МПТШ 19, 25
- Ртутный термометр 12, 14
- Санкторио 10
- Световой поток 306
- Свойства окружающей среды 79
- Сила излучения 306
- Сименс 13
- Система обеспечения единства измерений температуры 49
- Спектральная плотность энергетической светимости 306
- Среднеквадратичное отклонение 73
- Старение стекол 83
- Статическая характеристика ИПТ 58
- Стационарная температура Стефана—Больцмана закон 315
- Стрёмер 12
- Структурная схема средств измерения температуры 55
- Температурная шкала 15
- лампа 47
- Температурные индикаторы 372
- Тепловая инерционность ИПТ 67
- Тепловое излучение 304
- Тепловой шум 21
- Теплообмен излучением 66

- Термисторы 162
Термокарандаш 374, 377
Термокраска 373, 378, 380
Термолак 373
Термоконтатор 103
Термометр сопротивления 132, 139
Термометрические жидкости 84
— стекла 82
— свойства 15
Термопара 206
Термопаста 374
Термопорошок 377
Термопреобразователь сопротивления:
медный 137, 138
определение 132
платиновый 133, 137
полупроводниковый 160
Термоскоп 10
Термотаблетка 374
Термочувствительные краски 373
Термоэлектрическая неоднородность 209
Термоэлектрические явления 206
Термоэлектрический преобразователь 206
Термоэлектричество 13
Токи утечки 217
Томсон 12, 207
Томсона эффект 47, 207
Требуемая точность измерения 76
- Удлинительные провода 217
Уравнение шкалы 16
Уровень случайных помех 80
- Фазочастотная характеристика 70, 71
Фаренгейт 11
- Фотометрическая установка 45
Физико-технические характеристики термоэлектродов 246
Физические законы излучения 304
— свойства объекта 78
- Хемилюминесценция 412
Химическая стойкость стекол 83
- Цельсий 12
- Частотные передаточные функции 59
Чувствительность жидкостно-стеклянных термометров к давлению 89
Чувствительные элементы ТС 135, 139
- Шарля закон 17
Шток 13
Шумовой термометр 21
- Эйнштейн 21
Электролиты 132
Энергетическая освещенность 306
— светимость 306
— яркость 306
Энергия излучения 305
Эратосфен 9
Эталон температуры:
первичный 49
рабочий 49
— Фабри—Перо 419
Эталонный термометр сопротивления 31
— термоэлектрический термометр 32
Эффективная длина волны 333
Яркостная температура 308

ОЛЕГ АРКАДЬЕВИЧ ГЕРАЩЕНКО
АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ ГОРДОВ
ВЛАДИМИР ИВАНОВИЧ ЛАХ
БОГДАН ИВАНОВИЧ СТАДНЫК
НИКОЛАЙ АЛЕКСЕЕВИЧ ЯРЫШЕВ

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ
Справочник

Печатается по постановлению ученого совета
Института технической теплофизики АН УССР
и решению редакционной коллегии справочной
литературы АН УССР

Редактор *А. Я. Бельдид*
Оформление художника *Ю. В. Бойченко*
Художественный редактор *А. В. Косяк*
Технический редактор *А. М. Капустина*
Корректоры *О. Е. Исарова, Е. А. Михалец,*
Л. М. Тищенко, Р. С. Коган

Информ. бланк № 5818.

Сдано в набор 09.03.83. Подп. в печ. 02.03.84. БФ 01854.

Формат 84×108/32. Бумага тип. № 1. Лит. гарн.

Выс. печ. Усл. печ. л. 26,04. Усл. кр.-отт. 26,04.

Уч.-изд. л. 34,96. Тираж 6500 экз. Зак. 3-90.

Цена 2 р. 20 к.

Издательство «Наукова думка»,

252601, Киев 4, ул. Репина, 3.

Отпечатано с матриц книжной фабрики

им. М. В. Фрунзе. 310057 Харьков 57, Донец-

Захаржевского, 6/8 в областной книжной типогра-

фии, г. Львов, ул. Стефаника, 11. Зак. 3329.

2 руб. 20 коп.

• НАУКОВА ДУМКА •