



Победитель
общероссийского Конкурса рукописей
учебной и учебно-справочной литературы
по атомной энергетике 2010 г.



РОСАТОМ

Книга издана
при финансовой поддержке
Государственной корпорации
по атомной энергии "Росатом"

М.Н.Арнольдov, В.А.Каржавин, А.И.Трофимов

Основы метрологического обеспечения температурного контроля реакторных установок

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ ДЛЯ ВУЗОВ

Допущено УМО вузов России по образованию в области ядерных физики и технологий в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности "Электроника и автоматика физических установок" направления подготовки "Ядерная физика и технологии"



Москва
Издательский дом МЭИ
2012

УДК 621.384.039.5:389 (075.8)
ББК 31.46: 30.10я.73
А 841

Рецензенты:

доктор технических наук С.В. Приймак,
кандидат технических наук В.П. Корнилов

Арнольдов М.Н.

А 841 Основы метрологического обеспечения температурного контроля реакторных установок: учебное пособие для вузов / М.Н. Арнольдов, В.А. Каржавин, А.И. Трофимов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2012. — 248 с.: ил.

ISBN 978-5-383-00633-7

Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения контроля температуры в реакторных установках: законодательно-правовые, организационные и научно-технические. Даны методы проведения температурного контроля на основных энергетических реакторах России (ВВЭР, РБМК и БН) и определения погрешности измерений температуры. Описаны перспективные методы измерений температуры в условиях реакторного облучения.

Для студентов вузов, обучающихся по специальности «Электроника и автоматика физических установок». Пособие может быть полезно специалистам, эксплуатирующим реакторные установки различного назначения.

УДК 621.384.039.5:389 (075.8)
ББК 31.46: 30.10я.73

ISBN 978-5-383-00633-7

© Арнольдов М.Н., Каржавин В.А., Трофимов А.И., 2012
© ЗАО «Издательский дом МЭИ», 2012

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	7
Глава первая. Организационные и правовые основы метрологического обеспечения температурного контроля	8
1.1. Особенности измерений температуры в ядерных установках	8
1.2. Законодательно-правовые основы	11
1.3. Организационные основы	17
1.3.1. Организация метрологической службы в Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»	18
1.3.2. Метрологический контроль и надзор на реакторных установках	24
Контрольные вопросы	30
Глава вторая. Методы и средства температурного контроля на реакторных установках	31
2.1. Общие положения	31
2.1.1. Понятие о температуре	31
2.1.2. Температурные шкалы	33
2.2. Средства измерений температуры	41
2.2.1. Термоэлектрические преобразователи температуры	42
2.2.2. Термопреобразователи сопротивления	58
2.2.3. Вторичные преобразователи	63
2.2.4. Линии связи	70
2.3. Материалы средств измерений температуры	71
2.3.1. Материалы термоэлектродов	71
2.3.2. Конструкционные материалы	71
2.4. Метрологические характеристики средств измерений температуры	78
2.5. Классификация методов измерений	81
2.6. Методы и средства поверки (калибровки) средств измерений температуры	82
2.6.1. Поверка и калибровка средств измерений температуры	82
2.6.2. Применение реперных точек для поверки средств измерений температуры	85
2.6.3. Поверка методом сличения с показаниями образцового преобразователя	88
2.6.4. Межповерочные интервалы	94
Контрольные вопросы	95
Глава третья. Точность измерений температуры	96
3.1. Общие положения	96

3.2. Классификация погрешностей измерений.	97
3.2.1. Инструментальная погрешность.	100
3.2.2. Методическая погрешность.	104
3.2.3. Динамическая погрешность.	108
3.2.4. Основные источники инструментальной погрешности измерений температуры.	109
3.3. Оценка погрешностей измерений температуры.	131
3.4. Понятие о неопределенности измерения.	136
3.5. Примеры расчета расширенной неопределенности измерений температуры термодатчиками.	149
3.6. Влияние реакторного облучения на характеристики термоэлектродов и материалов для термопреобразователей сопротивления.	159
3.7. Надежность средств измерений температуры.	169
3.8. Диагностирование работоспособности преобразователей температуры.	176
Контрольные вопросы.	184
Глава четвертая. Температурный контроль на реакторных установках.	185
4.1. Измерение температуры узлов реакторных установок.	185
4.1.1. Измерение температуры теплоносителей.	185
4.1.2. Измерение температуры тепловыделяющих элементов.	189
4.1.3. Измерение температуры узлов реакторных установок.	191
4.1.4. Нештатные устройства для измерения температуры в активной зоне.	191
4.2. Измерение температуры на реакторных установках.	193
4.2.1. Энергетические реакторы типа ВВЭР.	193
4.2.2. Энергетические реакторы типа РБМК.	201
4.2.3. Реакторы Билибинской АТЭЦ.	205
4.2.4. Энергетические реакторы на быстрых нейтронах.	207
4.2.5. Исследовательские реакторы.	209
4.2.6. Реакторы судовых установок и космического назначения.	214
4.3. Технические основы обеспечения точности температурного контроля на реакторных установках.	214
Контрольные вопросы.	226
Глава пятая. Перспективные методы контроля температуры в реакторных установках.	227
Контрольные вопросы.	236
Заключение.	237
Список литературы.	240

Посвящается памяти академика АН СССР
и РАН В.И. Субботина, внесшего неоце-
нимый вклад в создание реакторной
термометрии

ВВЕДЕНИЕ

Температура является одним из важнейших параметров, определяющих безопасность и экономичность работы ядерных установок всех типов. В настоящее время разработаны многочисленные конструкции термоэлектрических преобразователей температуры и термопреобразователей сопротивления, методики измерений температуры, поверки и калибровки средств измерений температуры. Набран большой опыт наблюдений за их поведением в разных условиях эксплуатации. Этот опыт обобщен в ряде статей, докладов, монографий и справочников [1, 2, 3].

Вопросы реакторной термометрии постоянно находятся в поле зрения ведущих специалистов России. Большой вклад в развитие этой дисциплины внесли академик АН СССР и РАН В.И. Субботин и чл.-корр. РАН И.И. Федик. Большой вклад в разработку реакторной термометрии и создание образцов термометрической техники для реакторных установок внесен специалистами Государственного научного центра (ГНЦ) РФ «Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского» В.П. Корниловым, В.А. Кривцовым, Э.Б. Переславцевым, Ю.Н. Покровским, А.А. Фрактовниковой, НИКИЭТ — Б.В. Лысыковым и В.К. Прозоровым, НПО «Луч» — В.И. Наливаевым, П.П. Олейниковым, В.Б. Пампурой, С.В. Приймаком, М.А. Крыловой, РНЦ «Курчатовский институт» — Д.И. Кониным, В.И. Митиным, ГНЦ РФ НИИАР — Н.В. Маркиной, С.А. Маркиным, В.Ш. Сулаберидзе, сотрудником ОАО «Концерн Росэнергоатом» А.С. Тимониным и многими другими.

В учебном пособии обобщен опыт ведущих научных школ в области реакторной термометрии. Систематизированная информация научных публикаций изложена в виде, доступном для студентов вузов. Пособие основано на лекциях, читаемых авторами в Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ — Обнинском институте атомной энергетики.

Глава первая

ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ И ПРАВОВЫЕ ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЯ

1.1. Особенности измерений температуры в ядерных установках

Температурные измерения занимают существенную часть всех видов измерений. Треть всех преобразователей, выпускаемых в настоящее время для промышленности России, это преобразователи температуры. Необходимость измерения температуры следует из того, что сигналы преобразователей температуры используются в системах безопасности, контроля и управления нормальной эксплуатации АЭС (рис. 1.1) [4]. Эти сигналы используются при формировании команд на срабатывание аварийной защиты реактора, предупредительных защит, блокировок и сигнализации, задействованы в системах регулирования.

Измерения температуры важны для диагностирования состояния оборудования реакторных установок [5, 6]. Актуальными являются измерения не только температуры, но и шумов температуры теплоносителя. Изучая их, можно обнаруживать нарушения в теплогидравлике теплоносителя в активной зоне реактора.

В учебном пособии рассмотрены вопросы метрологического обеспечения (МО) контроля температуры на реакторных установках



Рис. 1.1. Средства измерений по видам измерений, используемые на АЭС

различных типов и назначений. Метрологическое обеспечение понимается как «установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений».

Метрологическое обеспечение для разных задач осуществляется различным образом. Оно иногда понимается расширенно и включает в себя ремонт средств измерений*. Иногда рамки МО ограничиваются только анализом погрешностей (неопределенностей) измерений.

Наиболее ответственные измерения температуры в энергетических ядерных установках с реактором типа ВВЭР осуществляются в системе внутриреакторного контроля (СВРК). Она является подсистемой автоматизированной системы управления технологическими процессами энергоблока АЭС (АСУ ТП АЭС). Система внутриреактивного контроля обеспечивает измерения температуры внутри реактора, а также в петлях контуров реакторного блока. Аббревиатура СВРК используется в документации на реакторы типа ВВЭР. В реакторах типа РБМК те же функции в рамках АСУ ТП АЭС выполняет система контроля, управления и диагностики (СКУД). Возможны и другие обозначения той же системы.

Количество точек контроля температуры на современных реакторных установках различных типов составляет нескольких тысяч. Выбор термоэлектрических преобразователей для измерений в активной зоне реактора определен тем, что они надежны в работе и имеют более стабильные характеристики при облучении, чем термопреобразователи сопротивления. Последние наиболее точны: погрешность измерения составляет 0,2—0,5 °С против 1—1,5 °С у термоэлектрических преобразователей. Однако они менее надежны и в значительно большей степени подвержены влиянию облучения. Термопреобразователи сопротивления в условиях реакторной установки применяются вне активной зоны: в контурах установки, в устройствах компенсации температуры холодных спаев термопар.

Другие типы систем измерений (СИ) температуры в реакторных условиях используются в значительно меньшем количестве и для менее ответственных измерений. Поэтому в учебном пособии рассмотрены только термоэлектрические преобразователи и термопреобразователи сопротивления.

* Понятие «средство измерений» обозначено, как это принято в метрологии, аббревиатурой СИ (не путать с обозначением системы единиц СИ!).

В монографии [1] предложена следующая классификация видов температурных измерений на реакторных установках:

- измерения температуры, выполняемые в поле радиоактивного излучения;
- измерения, выполняемые вне поля излучения.

В свою очередь реакторные измерения делят на виды:

- внутризонные, выполняемые в активной зоне реактора;
- внезонные, выполняемые вне активной зоны, но испытывающие воздействие ослабленного радиоактивного излучения.

Преобразователи температуры делят на штатные и экспериментальные. К штатным относят преобразователи, предусмотренные проектом установки для регулярных измерений температуры в целях контроля работы оборудования и его защиты. Экспериментальными являются преобразователи, с помощью которых осуществляются измерения при исследованиях реакторной установки. Эти исследования проводятся на этапе освоения новых, головных блоков для уточнения некоторых параметров, характеризующих работу оборудования этих блоков. Иногда они сопровождают и штатную эксплуатацию реакторных блоков.

Измерения проводятся на различном оборудовании реакторных блоков. Измеряются температуры центра и оболочек твэл, теплоносителя, металлоконструкций, графитовой защиты, оборудования (например, элементов СУЗ) и т.п. Каждый вид измерений требует своего методического подхода, конструктивного решения, применения различных типов преобразователей.

Имея методы и устройства измерения температуры, общие с методами и устройствами в других областях техники, измерения в ядерных реакторах имеют свои существенные отличия. Они определяются, прежде всего, наличием и воздействием ионизирующих излучений. Кроме того, они отличаются широким диапазоном температур и механических нагрузок, воздействием специфических технологических сред (жидкометаллических теплоносителей, дезактивирующих жидкостей), ограниченными возможностями восстановления вышедших из строя измерительных устройств и проведения поверочных или калибровочных процедур, малыми размерами объектов измерений, большими периодами времени между остановками на планово-предупредительный ремонт или вообще отсутствием таких остановок (например, на будущих космических установках с ресурсом в 10 лет) и т.д.

Следует также учитывать большую протяженность линий связи первичных преобразователей и вторичной аппаратуры.

Все эти особенности накладывают специфичные требования на выбор СИ температуры, требования к их конструкциям, к показателям надежности.

Степень метрологического обеспечения работы объектов атомной отрасли различна [7]. Наиболее обеспеченными в метрологическом отношении являются атомные электростанции.

1.2. Законодательно-правовые основы

До 2002 г. законодательно-правовая часть метрологического обеспечения основывалась на Законах Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений», «О стандартизации», «О сертификации», а также на Государственных и ведомственных стандартах и стандартах отраслей и предприятий. В 2002 г. был принят Закон РФ «О техническом регулировании», который меняет подходы к метрологическому обеспечению, стандартизации и сертификации.

Верхний уровень законодательно-правовой базы метрологического обеспечения составляет ст. 71 Конституции РФ, пункт «р», в котором говорится, что «... стандарты, эталоны, метрическая система и исчисление времени ...» находятся в сугубо федеральном ведении. Следующий уровень законодательно-правовой пирамиды — законодательный. В ней разворачивается конституционная норма. Нормативная база государственной системы обеспечения единства измерений в России отражена в табл. 1.1.

Закон РФ «Об обеспечении единства измерений» был принят в 1993 г. Он создан в соответствии с модельным законом, который в свою очередь разработала Международная организация законодательной метрологии. В процессе применения этого закона выявились некоторые неточности и противоречия, поэтому возникла необходимость в принятии новой версии закона. Потребность в корректировке

Таблица 1.1

Нормативная база государственной системы обеспечения единства измерений

№ п/п	Норматив
1	Конституционная норма по вопросам метрологии
2	Закон Российской Федерации «О техническом регулировании»
3	Закон Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений»
4	Постановления Правительства РФ по отдельным вопросам (направлениям) метрологической деятельности

этого закона возникла также и в связи с принятием в 2002 г. Закона РФ «О техническом регулировании». Поэтому в 2008 г. была принята новая версия Закона «Об обеспечении единства измерений» (№ 102-ФЗ).

Вопросы конкретной реализации положений законов разрабатываются и утверждаются на уровне подзаконных актов. К ним относятся распоряжения и постановления Правительства РФ, указы и распоряжения Президента РФ. В Федеральном агентстве по техническому регулированию и метрологии (ФАТРИМ) разрабатываются правила по метрологии, в которых конкретизируется порядок исполнения определенных статей законов.

Ниже приведены некоторые характерные положения Закона РФ «Об обеспечении единства измерений».

В ст. 2 закона указывается: «... единство измерений — состояние измерений, при котором их результаты выражены в допущенных к применению в Российской Федерации единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы». В этой же статье даются определения понятий о поверке и о калибровке СИ. Содержание этих понятий будет раскрыто в п. 2.6.1.

В соответствии с Законом РФ «Об обеспечении единства измерений» единство измерений обеспечивается:

- применением только узаконенных единиц физических величин;
- воспроизведением физических величин с помощью государственных первичных эталонов;
- применением узаконенных СИ, которые прошли государственные испытания и которым переданы размеры единиц физических величин от государственных эталонов;
- обязательным периодическим контролем через установленные промежутки времени метрологических характеристик применяемых СИ;
- использованием результатов измерений только с оценкой их погрешности с заданной доверительной вероятностью;
- систематическим контролем над соблюдением метрологических правил и норм, государственным надзором и ведомственным контролем над СИ.

Важнейшей стороной метрологического обеспечения любых измерений является стандартизация. Следствие процесса стандартизации — это выпуск стандартов и другой нормативной документации. В Российской Федерации до сих пор продолжают действовать некоторые стандарты, выпущенные в СССР.

Одной из основных целей стандартизации является обеспечение единства измерений. К ней относится установление единицы измерения температуры. В соответствии с ГОСТ 8.417—2002 «ГСИ. Единицы физических величин» основной единицей измерения термодинамической температуры является кельвин (К), равный $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды. Производными этой единицы являются мегакельвины (МК), килокельвины (кК), милликельвины (мК) и микрокельвины (мкК). Кроме обозначения температуры в единицах Кельвина (обозначение T) этот ГОСТ допускает применение также единиц Цельсия (обозначение t), определяемой выражением $t = T - 273,15$ К. Температура Цельсия выражается в градусах Цельсия, °С. По размеру градус Цельсия равен кельвину. В соответствии с ГОСТ разность температур Кельвина полагается выражать в кельвинах, разность температур Цельсия — как в кельвинах, так и в градусах Цельсия. Обозначение температуры в Международной температурной шкале 1990 г. может быть дополнено индексом «90», например, T_{90} или t_{90} . Применение других единиц измерения температуры не допускается.

Однако в некоторой части мировой, главным образом американской, технической литературы до сих пор используется температурная шкала Фаренгейта. Для перевода показаний из шкалы Фаренгейта в шкалу Цельсия и наоборот нужно пользоваться соотношениями

$$t\text{ }^{\circ}\text{C} = \left(\frac{9}{5} \Theta + 32\right)^{\circ}\text{F}, \quad \Theta^{\circ}\text{F} = \frac{5}{9} (t - 32)^{\circ}\text{C}, \quad 1^{\circ}\text{F} = \frac{5}{9}^{\circ}\text{C}.$$

Другая сторона понятия «единство измерений» — указание погрешности измерения температуры, не выходящей за установленные границы с заданной доверительной вероятностью. Она обеспечивается с помощью набора общих стандартов, касающихся методов обработки результатов измерений.

Важным разделом термометрии является установление закономерности передачи размера единицы температуры от эталонного значения к образцовым и рабочим СИ температуры. Государственные первичные эталоны России воспроизводят Международную температурную шкалу 1990 г. (МТШ-90) в двух температурных поддиапазонах: $0,8\text{—}273,16$ К и $273,16\text{—}2773$ К. Для каждого из этих поддиапазонов существует свой стандарт на государственный первичный эталон и общероссийскую поверочную схему для СИ температуры.

Другая важная цель стандартизации — установление стандартизованных номинальных статических характеристик (НСХ) термопар

различных градуировок и термопреобразователей сопротивления. В настоящее время действует ГОСТ Р 8.585—2001 «Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования». В нем представлены градуировочные характеристики для термопар (табл. 1.2).

Для каждого типа термопары в ГОСТ Р 8.585—2001 приведены градуировочные таблицы, формулы для вычисления пределов допускаемых отклонений термоЭДС термопар в температурном выражении от номинального значения и аппроксимирующие полиномы НСХ в виде

$$E = \sum_{i=1}^n A_i t^i,$$

где E — в мВ; t — в °С; A — коэффициенты. Число членов n и значения коэффициентов A зависит от типа термопары и для некоторых термопар от диапазона температуры. Количество членов n для разных термопар меняется от 3 до 9.

В ГОСТ Р 8.625—2006 «Термометры сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытания» приведены требования к термопреобразователям сопротивления. Их

Таблица 1.2

Стандартизованные термоэлектрические пары

Обозначение		Термоэлектроды	
русское	латинское	обозначение	название
ПП	R	Pt-13 %Rh/Pt	Платина-13 % платинородий
ПП	S	Pt-10 %Rh/Pt	Платина-10 % платинородий
ПР	B	Pt-30 %Rh/Pt-6 %Rh	Платинородий 6—30 %
ЖК	J	Fe/Cu-Ni	Железо-константан
МК	T	Cu/Cu-Ni	Медь-константан
ХК	L	Ni-Cr/Cu-Ni	Хромель-константан (копель)
ХА	K	Ni-Cr/Ni-Al	Хромель-алюмель
НН	N	Ni-Cr-Si/Ni-Si	Нихросил-нисил
ХКн	E	Ni-Cr/Cu-Ni	Хромель-константан
МК	M	Cu/Cu-Ni	Медь-копель
ВР	A (A-1, A-2, A-3)	W-5 %Re/W-20 %Re	Вольфрам-рений

обозначения и другие сведения даны в табл. 1.3. Следует обратить внимание на то, что в этом стандарте в отличие от прежних стандартов отменены обязательные требования к номинальному сопротивлению — сопротивлению при 0 °С. Таким образом, термометры могут изготавливаться не только на номиналы 1, 10, 50, 100, 500 Ом, но и на любые другие.

Кроме термопар и термопреобразователей сопротивления существуют преобразователи температуры, не имеющие стандартных характеристик и используемые в экспериментальной практике (см. гл. 5). Эти преобразователи могут быть стандартизованы при необходимости в отраслевом масштабе или в рамках отдельного предприятия. Со временем и при необходимости эти преобразователи могут быть узаконены в государственном масштабе. Целью стандартизации является также установление технических условий на отдельные виды преобразователей температуры. Примером является действующий до сих пор ГОСТ 23847—79 «Преобразователи кабельных типов КТХАС, КТХАСп, КТХКС».

Стандартизация может распространяться на типовые технологические процессы производства термопар: сварку, волочение, герметизацию и т.д. Существуют стандарты и другие документы, относящиеся к видам СИ, применяемых в конкретных отраслях промышленности. Преимущественно этот вид стандартизации используется в отдельных отраслях и предприятиях. Стандартизуются методы и средства поверки преобразователей температуры, отдельные элементы преобразователей температуры: проволока, чехлы, электрическая изоляция и т.п.

Таблица 1.3

Обозначения типа, температурные коэффициенты и классы допуска термометров сопротивления (ТС) и чувствительных элементов (ЧЭ) по ГОСТ Р 8.625—2006

Тип ТС	Обозначение	$\alpha, ^\circ\text{C}^{-1}$	Класс допуска		
			для проволочных ЧЭ	для пленочных ЧЭ	для ТС
Платиновый	Pt	0,00385	W 0,1; W 0,15; W 0,3; W 0,6	F 0,1; F 0,15; F 0,3; F 0,6	AA, A, B, C
	П	0,00391	AA, A, B, C	AA, A, B, C	AA, A, B, C
Медный	M	0,00428	A, B, C	—	A, B, C
Никелевый	N	0,00617	C	—	C

В 2002 г. был принят Закон Российской Федерации «О техническом регулировании», имеющий значение и для метрологии. Рассмотрим некоторые выдержки из него.

Техническое регулирование — правовое регулирование в области установления, применения и исполнения обязательных требований к объектам технического регулирования, а также на добровольной основе требований к объектам регулирования. Под объектами регулирования в законе понимают продукцию, процессы производства, эксплуатацию, хранение, перевозку, реализацию, утилизацию, услуги и т.п.

Важным в этом законе является понятие о техническом регламенте. Под ним понимают документ, который устанавливает обязательные для применения и исполнения требования к объектам технического регулирования. Технический регламент может быть принят международным договором, Федеральным законом, указом Президента РФ, постановлением Правительства РФ.

Целью принятия технических регламентов является защита жизни или здоровья граждан, имущества, охрана окружающей среды, жизни или здоровья животных и растений, предупреждение действий, вводящих в заблуждение приобретателей. Содержание технических регламентов составляют минимально необходимые требования к безопасности в широкой области производственной деятельности, в том числе в ядерной и радиационной безопасности. К техническому регламенту относятся также положения, которые обеспечивают единство измерений.

Стандарт в Законе «О техническом регулировании» определяется как документ, в котором **добровольно** устанавливаются характеристики продукции, процессов производства и пр. Стандарт может также содержать предложения по терминологии, символике и т.п. Закон предусматривает следующие виды стандартов: национальные стандарты, стандарты организаций, правила, нормы, рекомендации, классификации и классификаторы. Существовавшие ранее отраслевые стандарты этим законом не предусмотрены.

Таким образом, в регламентах устанавливаются существенные показатели, а в стандартах — конкретные. «Стандартизация подтягивает, а регламенты подталкивают». Производитель обязан исполнять требования технических регламентов, но имеет право принимать или не принимать стандарты. Поэтому перечисленные выше стандарты, будут ли они сохранены, или переработаны, не обязательны для исполнения. Производитель обязан показать, что отказ от стандарта не нарушает требований технических регламентов.

Одной из заявленных целей Закона «О техническом регулировании» является повышение конкурентоспособности. Производитель, как сказано выше, имеет право не учитывать требования стандартов, например, на типы и характеристики термопар. Но в этом случае он едва ли найдет сбыт своей продукции. Поэтому путь внедрения стандартов должен быть привлекателен для производителей.

Закон «О техническом регулировании» регламентирует разделение надзорных функций и функций оказания государственных услуг. Это означает, что региональные центры метрологии и стандартизации должны выбрать для себя лишь одну из перечисленных функций. Отметим, что внедрение Закона «О техническом регулировании» в практику находится в начале пути. Предстоит разработать сотни технических регламентов. Возможно, потребуются некоторые корректировки закона в процессе его внедрения.

До принятия регламента по ядерной и радиационной безопасности техническое регулирование в этой области осуществляется в соответствии с Законами РФ «Об использовании атомной энергии» и «О радиационной безопасности населения». Законы «О стандартизации» и «О сертификации продукции и услуг» признаются утратившими силу. Закон «Об обеспечении единства измерений» пока сохраняет свою обязательность к исполнению.

1.3. Организационные основы

Вопросы обеспечения единства измерений в России с 2004 г. находятся в ведении Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии Министерства промышленности и энергетики РФ — ФАТРИМ (ранее Государственного комитета Российской Федерации по метрологии и стандартизации, еще ранее Государственного комитета СССР по метрологии и стандартизации). Основными задачами, решаемыми ФАТРИМ, являются:

- реализация функций национального органа по стандартизации;
- обеспечение единства измерений;
- осуществление работ по аккредитации органов по сертификации и испытательных лабораторий (центров);
- осуществление государственного контроля (надзора) за соблюдением требований технических регламентов и требований стандартов;
- создание и ведение федерального информационного фонда технических регламентов и стандартов и единой информационной системы по техническому регулированию;

- осуществление организационно-методического руководства по ведению федеральной системы каталогизации продукции для федеральных государственных нужд;
- организация проведения работ по учету случаев причинения вреда вследствие нарушения требований технических регламентов;
- организационно-методическое обеспечение проведения конкурса на соискание Премии Правительства Российской Федерации в области качества и других конкурсов в области качества;
- оказание государственных услуг в сфере, стандартизации, технического регулирования и метрологии.

В рамках этих задач ФАТРИМ контролирует, в том числе, вопросы измерения температуры во всех отраслях хозяйства страны. Ряд научно-исследовательских институтов ФАТРИМ являются ответственными за измерения конкретных физических величин, например Всероссийский институт метрологии им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ), Уральский научно-исследовательский институт метрологии (УНИИМ), Сибирский государственный научно-исследовательский институт метрологии (СГНИИМ), Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). В ведении этих институтов находятся так же и вопросы измерения температуры. Вместе с тем отдельные отрасли также имеют свои метрологические службы.

1.3.1. Организация метрологической службы в Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»

Метрологическая служба в Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» — Государственная корпорация (ГК) «Росатом» (до 2008 г. — в Федеральном агентстве по атомной энергии — ФААЭ, до 2004 г. — в Министерстве по атомной энергии РФ) повторяет структуру Государственной метрологической службы. Она формировалась следующим образом.

Приказом министра Минатома в 1994 г. была создана Система метрологической службы министерства. Ответственность за метрологическую политику в Минатоме возложили на службу главного метролога и Центральную головную организацию метрологической службы (ЦГОМС) в составе Всероссийского научно-исследовательского института неорганических материалов имени А.А. Бочвара. В том же году было принято Положение о метрологической службе Министерства РФ по атомной энергии. Положение распространялось на все предприятия Минатома независимо от форм собственности,

в том числе на предприятия, организации, атомные станции, концерны, акционерные общества и др.

Система метрологического обеспечения соответствует Законам РФ «Об обеспечении единства измерений» и «Об использовании атомной энергии», а также другим действующим нормативным актам.

Метрологическая служба ГК «Росатом» включает:

- службу главного метролога ГК «Росатом»;
- головные организации метрологической службы по видам деятельности или измерений (научные центры по метрологическому обеспечению);
- базовые организации метрологической службы по видам деятельности.

К главным задачам метрологической службы в ГК «Росатом» относятся:

- обеспечение единства измерений, повышение уровня и развитие техники измерений на предприятиях отрасли;
- определение основных направлений деятельности метрологического обеспечения исследований, разработок, производства, испытаний, эксплуатации продукции и объектов атомной техники;
- осуществление метрологического контроля на предприятиях отрасли;
- создание и внедрение современных методов и СИ, контрольно-измерительного оборудования, информационно-измерительных систем, стандартных образцов состава и свойств веществ, эталонов, стендов и установок для поверки и калибровки СИ и т.д.

Центральная головная организация метрологической службы ГК «Росатом» является отраслевым научным центром в области метрологического обеспечения ГК «Росатом», рабочим органом службы главного метролога ГК «Росатом».

В соответствии с приказом министра по атомной энергии от 1994 г. к метрологической службе министерства (ГК «Росатом») относятся головные организации:

- по метрологическому обеспечению измерения ионизирующих излучений — НИЦ СНИИП;
- по метрологическому обеспечению работ по вооружению и военной технике — РФЯЦ ВНИИЭФ;
- по метрологическому обеспечению развития и эксплуатации атомных станций — НИМС «АТОМТЕХЭНЕРГО»;
- по метрологическому обеспечению измерения потоков ионизирующих излучений при проведении радиационных испытаний специальной техники — НИИП;

- по метрологическому обеспечению реакторных и послереакторных испытаний и исследований материалов и изделий — ГНЦ РФ НИИАР;
- по метрологическому обеспечению измерений температуры, давления и расхода жидкостей и газов в условиях работы ядерных установок различного назначения — ГНЦ РФ—ФЭИ;
- по обеспечению методов и средств сбора и систематизации данных путем участия в работах по аккредитации и аттестации данных о свойствах веществ и материалов — ЦНИИАтоминформ (в настоящее время эта организация расформирована).

К задачам, решаемым базовыми организациями, относятся разработка технической политики по закрепленным видам измерений, осуществление метрологического надзора на предприятиях отрасли по видам измерений, по проведению исследований и разработкам эталонов, стандартных образцов, СИ, методик выполнения измерений и т.п. Базовой организацией метрологической службы в Управлении по атомной энергии ГК «Росатом» (до 2004 г. — по Департаменту по атомной энергетике Минатома) является ГНЦ РФ—ФЭИ.

Основными задачами базовых организаций являются проведение анализа состояния измерений на предприятиях Управления, участие в разработке средств и методов измерений, в создании эталонов и пр., в метрологическом обеспечении разработок новых видов продукции, процессов, осуществление метрологического контроля и надзора и т.п.

Следует отметить, что указанный выше приказ в настоящее время не выполняется в полном объеме, что связано в первую очередь с отсутствием финансирования работ, предусмотренных приказом. В частности, практически не осуществляются функции головных организаций по закрепленным видам измерений.

Низшим звеном являются метрологические службы предприятий, обязательные как самостоятельные структурные подразделения и возглавляемые главным метрологом или главным прибористом предприятия. Их задачами являются:

- обеспечение единства измерений в рамках предприятия;
- организация и проведение поверки и калибровки, ремонта СИ, находящихся в эксплуатации на предприятии;
- проведение метрологической аттестации методик выполнения измерений и метрологической экспертизы документации и т.п.

В соответствии с Законом «Об обеспечении единства измерений» и ГОСТ Р 8.565—96 «Метрологическое обеспечение эксплуатации атомных станций» в структуре АЭС имеется самостоятельное под-

разделение метрологии (отдел, цех, лаборатория). Метрологическую службу АЭС возглавляет главный метролог, подчиняющийся непосредственно главному инженеру АЭС и независимый от руководителей других подразделений.

Важным шагом в корректировке системы МО является выработка концепции МО в ГК «Росатом», закрепление концептуальных положений в нормативном документе, переработка и утверждение в установленном порядке остальных документов системы. Для разработки основополагающих концептуальных положений была образована Рабочая группа, в которую вошли специалисты Минатома России и Госстандарта России. Рабочей группой разработан проект концепции, в основу которой были положены предложения Госстандарта России, изложенные в документе «Концепция метрологического обеспечения в Минатоме России» [8]. Основные положения документа следующие:

- при осуществлении метрологической деятельности обязательным является выполнение требований Законов Российской Федерации, в частности, «Об обеспечении единства измерений», «Об использовании атомной энергии», «О государственной тайне»;
- Госстандарт России (в настоящее время ФАТРИМ) осуществляет управление деятельностью по обеспечению единства измерений в России, устанавливает метрологические правила и порядок выполнения работ в этой области;
- Минатом России (ГК «Росатом») является федеральным органом исполнительной власти, на который возложено проведение государственной политики в области разработки, производства и утилизации ядерных боеприпасов и атомной энергетики, а также осуществление государственного управления использованием атомной энергии;
- Минатом России (ГК «Росатом») является многоотраслевой структурой с существенной производственной спецификой отрасли. Многие предприятия наряду с профильным производством выпускают продукцию общетехнического (гражданского) назначения и в этом качестве функционируют в условиях рыночной экономики как самостоятельные субъекты;
- метрологическая служба Минсредмаша — Минатома России сохраняет в настоящее время значительный интеллектуальный технический и организационный потенциал для полноценного метрологического обеспечения измерений;

- метрологическая политика и практика организации метрологического обеспечения измерений в Минатоме России (ГК «Росатом») должна учитывать специфику отраслей и отдельных предприятий;

- принцип организации метрологического обеспечения измерений в своей основе должен иметь иерархичность с сохранением отраслевого управления метрологическими службами предприятий при самостоятельности последних в решении конкретных вопросов обеспечения единства измерений в пределах своей компетенции.

Правовую базу функционирования отраслевых метрологических служб Минатома России (ГК «Росатом») должны составлять:

- утверждаемые совместно Госстандартом России (ФАТРИМ) и Минатомом России (ГК «Росатом») положения о системе обеспечения единства измерений в отраслях;

- утверждаемые Госстандартом России (ФАТРИМ) отраслевые правила по метрологии, разрабатываемые на основе законов Российской Федерации и конкретизирующие основные положения общих правил по метрологии ФАТРИМ с учетом специальных отраслевых требований;

- метрологическую политику в ГК «Росатом» обеспечивает служба главного метролога и Центральная метрологическая служба как рабочий орган службы главного метролога.

Приоритетные задачи этого рабочего органа следующие:

- координация и управление деятельностью по разработке и актуализации единой для ГК «Росатом» нормативно-методической документации по метрологии;

- обеспечение эффективного межотраслевого использования эталонной базы, ее оптимизация и совершенствование;

- ведение служб стандартных образцов и стандартных справочных данных;

- регулирование деятельности в области испытаний и сертификации средств измерений, совершенствование и эффективное использование испытательных центров и лабораторий.

Метрологический контроль и надзор на предприятиях ГК «Росатом» должны осуществляться, исходя из основной цели метрологического обеспечения измерений на предприятиях. Получение достоверной информации необходимо для выполнения задач:

- обеспечения требуемого качества продукции;

- обеспечения безопасности (прежде всего ядерной и радиационной);

- подтверждения необходимого качества и определения фактических уровней воздействия различных факторов на персонал, насе-

ление, окружающую среду для их официальной регистрации и проведения корректирующих мероприятий.

Первые две позиции находятся в сфере непосредственной ответственности предприятий и дополнительно контролируются специализированными государственными надзорными органами (Госзаказчиком, Госатомнадзором в составе Ростехнадзора России, Госсанэпиднадзором России и др.). Эти организации должны определить сферу ответственности и регламентации соответствующих процедур через отраслевые правила по метрологии. Последняя позиция подпадает под сферу распространения государственного метрологического контроля и надзора.

Осуществление государственного метрологического контроля и надзора в системе ГК «Росатом» должно включать:

- уполномочие ФАТРИМ по представлению ГК «Росатом» метрологических служб предприятий на соответствующий вид контроля через их аккредитацию;
- надзор за выпуском, состоянием и применением СИ, методиками выполнения измерений, эталонами, соблюдением метрологических правил и норм, организуемым ФАТРИМ через межведомственные комиссии по взаимосогласованным правилам.

В соответствии с этими положениями рассмотрен и одобрен подкомитетом ПК-27 проект структуры организации метрологического обеспечения измерений в ГК «Росатом».

Государственная корпорация «Росатом» управляет метрологической деятельностью через отраслевые центры и обеспечивает межотраслевую координацию через рабочий орган и подкомитет ПК-27 «Метрология».

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии управляет деятельностью по обеспечению единства измерений совместно с ГК «Росатом» через Межведомственные координационные научно-технические советы (МКНТС) отраслей ГК «Росатом» и осуществляет государственный метрологический надзор через Межведомственные комиссии. Вся метрологическая деятельность ГК «Росатом» осуществляется в рамках ядерно-энергетического и ядерно-оружейного комплексов.

Для научно-методического руководства по вопросам метрологического обеспечения измерений в отраслях ГК «Росатом» ФАТРИМ назначает головные организации из числа компетентных Государственных научных метрологических центров (ГНМЦ) или Центров стандартизации и метрологии (ЦСМ).

Межотраслевой научно-технический совет создается совместным решением ГК «Росатом» и ФАТРИМ из своих представителей, головных и базовых метрологических служб отрасли, уполномоченных организаций ФАТРИМ. Положение о совете и его состав утверждаются совместно ГК «Росатом» и ФАТРИМ.

Метрологические службы предприятий ГК «Росатом» взаимодействуют с государственными научными метрологическими центрами и территориальными органами ФАТРИМ по вопросам практической метрологической деятельности наряду.

1.3.2. Метрологический контроль и надзор на реакторных установках

В Законе «Об обеспечении единства измерений» дано следующее определение: «... метрологический контроль и надзор — деятельность, осуществляемая органом государственной метрологической службы или метрологической службы юридического лица в целях проверки соблюдения установленных метрологических правил и норм».

Государственный метрологический контроль включает ряд видов деятельности, в том числе:

- утверждение типа СИ, под которым понимается совокупность средств измерений, имеющих одинаковое назначение, схему и конструкцию и удовлетворяющих одним и тем же требованиям, регламентированным в технических условиях; таким образом, например, термоэлектрический преобразователь данной конструкции представляет один тип, другой конструкции — другой тип;
- поверка СИ, в том числе эталонов;
- лицензирование деятельности юридических и физических лиц по изготовлению и ремонту СИ.

Государственный метрологический надзор осуществляется в основном за выпуском, состоянием и применением СИ, соблюдением метрологических правил и норм на предприятиях.

Метрологические службы юридических лиц осуществляют метрологический надзор и контроль путем:

- калибровки средств измерений, надзора за состоянием и применением СИ, методик выполнения измерений, соблюдением норм и правил, нормативных документов;
- проверки своевременности представления СИ на испытания, поверку, калибровку.

Эти службы имеют право на выдачу обязательных для исполнения предписаний, направленных на предотвращение, прекращение или

устранение нарушений метрологических норм и правил. Отдельные виды государственного контроля и надзора могут быть переданы аккредитованным метрологическим службам юридических лиц.

Особенности метрологического контроля и надзора на реакторных установках, в том числе и по отношению к средствам измерений температуры, определяются спецификой конструкций и эксплуатации этих установок, в первую очередь тем, что они относятся к сложным техническим объектам, обладающим повышенной потенциальной опасностью.

Метрологический надзор на реакторных установках основан на Законах Российской Федерации «Об обеспечении единства измерений» и «Об использовании атомной энергии». Кроме того, действуют ГОСТ Р 8.565—96 «Метрологическое обеспечение эксплуатации атомных станций» и более сотни специальных правил и норм (серия ПНАЭ). Эти документы нормативного характера охватывают все этапы жизненного цикла АЭС.

Основу метрологического обеспечения эксплуатации АЭС составляют метрологические службы АЭС. Типовая структурная схема метрологической службы АЭС представлена на рис. 1.2 [4]. Метрологические службы всех АЭС объединены в общую метрологическую службу концерна «Росэнергоатом» — головную организацию метрологической службы по развитию и эксплуатации АЭС — Научно-исследовательский центр метрологии (НИЦМ АЭС). Объектами метрологического обеспечения являются технологические процессы на АЭС, их элементы или операции, комплексы применяемых технических средств и систем, отдельные устройства и элементы, программные средства обработки, передачи и отображения информации, а также методики выполнения измерений.

Основные задачи метрологического обеспечения на АЭС заключаются в следующем:

- использовании допущенных единиц измерения;
- применении утвержденных типов СИ и измерительных систем;
- поверке и калибровке СИ;
- применении аттестованных методик выполнения измерений;
- применении стандартных образцов состава веществ, стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ;
- взаимодействии метрологических служб АЭС, службы главного метролога концерна «Росэнергоатом» и метрологических научных институтов ФАТРИМ;
- подготовке и повышении квалификации в области метрологии метрологов и оперативного персонала.

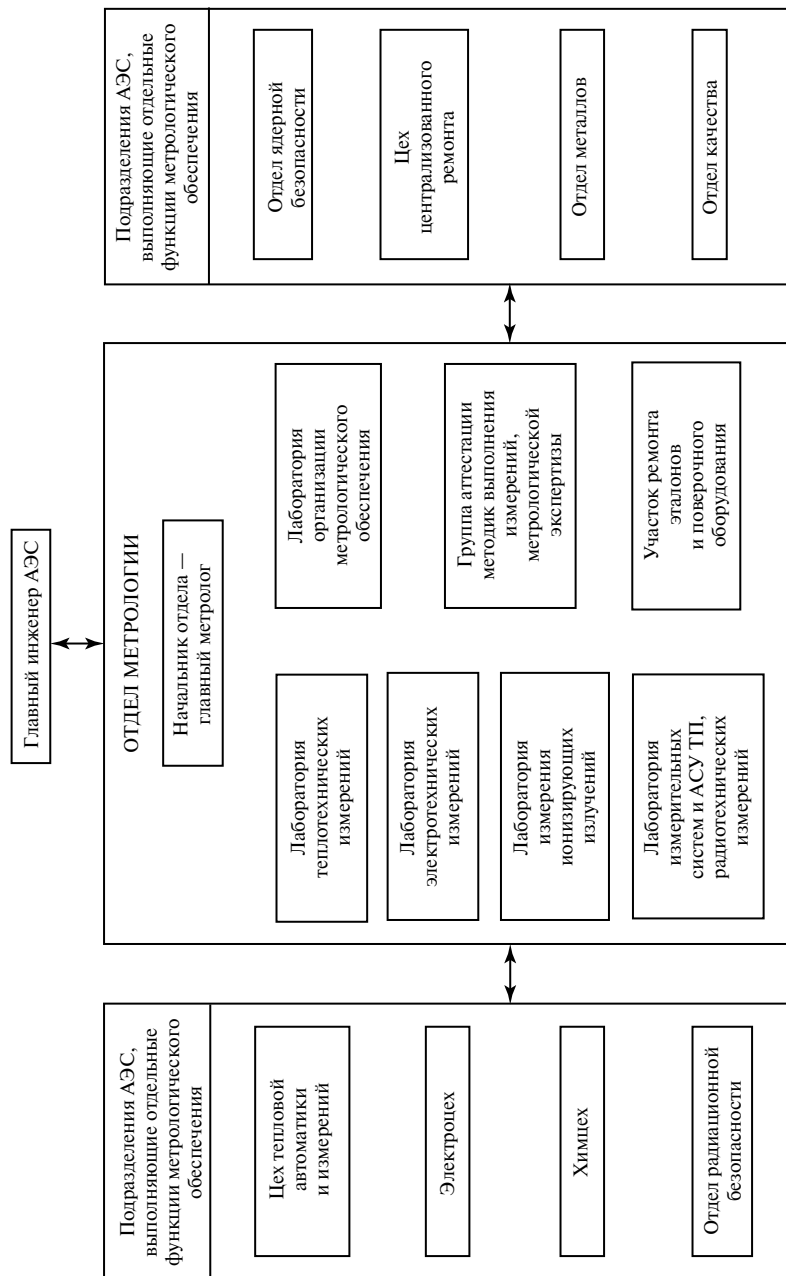


Рис. 1.2. Типовая структура метрологической службы АЭС

Основным направлением деятельности метрологической службы по развитию и эксплуатации АЭС является обеспечение качества эксплуатации АЭС путем получения результатов измерений, которые гарантируют ведение безопасного технологического процесса, исключают или сводят к минимуму риск принятия ошибочных решений или действий при управлении оборудованием и в целом АЭС, а также ведение достоверного контроля безопасности персонала и состояния окружающей среды [4].

Метрологическое обеспечение эксплуатации АЭС предусматривается на всех этапах жизненного цикла АЭС: разработка оборудования, технических средств и процедур, проектирование, строительство и ввод в эксплуатацию, эксплуатация, вывод из эксплуатации. На каждом этапе цикла должен решаться свой набор задач и проблем.

Этап разработки оборудования, технических средств, процедур. Техническое задание на разработку оборудования, технических средств и процедур для АЭС должно предусматривать применение средств встроенного контроля, обеспечивающих, как правило, их автоматическую бездемонтажную поверку и калибровку.

Этап проектирования. Устанавливаются номенклатура параметров, подлежащих измерению, и диапазоны их изменений на каждом этапе жизнедеятельности, требования к точности измерения, номенклатура СИ и необходимых эталонов, методики поверки и калибровки, методики выполнения измерений и т.д.

Этап строительства АЭС и ввода ее в эксплуатацию. Проводятся первичная поверка и калибровка СИ, метрологические испытания СИ, не прошедших испытания в целях утверждения типа СИ.

Этап эксплуатации АЭС. Проводятся поверка и калибровка СИ, работы по повышению качества измерений на АЭС, в том числе, модернизация технических средств и методик измерений. Для повышения надежности получаемой измерительной информации используется дополнительная информация, которая получается вследствие наличия функциональной связи измеряемых параметров, например связь давления и температуры газа в замкнутом объеме, связь температуры квазиизотермического режима работы энергоблока и показаний термопреобразователей и т.п.

Одной из важных задач метрологического обеспечения измерений на АЭС является разработка номенклатурного перечня СИ, каналов измерительных систем и методик выполнения измерений, ранжирование их по классам безопасности по ОПБ-88/97 и влиянию на экономические показатели АЭС.

Все измерительные каналы на АЭС, в том числе и СИ температуры, с точки зрения метрологического обслуживания делят на четыре группы:

- 1 — подлежащие поверке;
- 2 — подлежащие калибровке;
- 3 — недоступные для метрологического обслуживания в межповерочный (межкалибровочный) интервал;
- 4 — переведенные в класс индикаторов.

Все СИ, эксплуатируемые на АЭС, должны удовлетворять условиям эксплуатации, а также повышенным требованиям по ряду характеристик, к которым относятся:

- требования, обусловленные особенностями места размещения в помещениях АЭС;
- требования по надежности, устойчивости к вибрационным и сейсмическим воздействиям, к воздействию дезактивирующих растворов;
- требования к приемке.

Все СИ температуры на АЭС, как и другие СИ, делят по размещению на семь групп (табл. 1.4).

К приборам каждой группы предъявляют специфические требования по воздействию в различных режимах работы установки: нормальный режим, при нарушении теплоотвода, аварийный режим

Таблица 1.4

Группы средств измерений

№ группы	Размещение
1	Герметичная зона
2	Технологические необслуживаемые зоны строгого режима
3	Технологические полуобслуживаемые (периодически обслуживаемые) зоны строгого режима
4	Технологические помещения зоны свободного режима
5	Помещения технических средств автоматизации (периодически обслуживаемые)
6	Помещения щитов управления (постоянного пребывания персонала): зоны строгого режима; зоны свободного режима
7	Открытый воздух

«малой» или «большой» течи, а также при воздействии дезактивационных средств. Приборы и их части должны быть работоспособны без обслуживания, без подстройки не менее:

- 8 тыс. ч для групп по размещению 1 и 2;
- 4 тыс. ч для группы по размещению 3;
- 2 тыс. ч для групп по размещению 4, 5, 6, 7.

При этом метрологические и другие характеристики приборов не должны выходить за пределы, указанные в технических условиях на СИ.

Кроме специфических требований СИ должны иметь исполнения по защищенности от внешнего воздействия воды, по пылезащищенности и т.д.

Важным подразделением атомной электростанции в системе метрологического обеспечения измерений различных параметров явля-

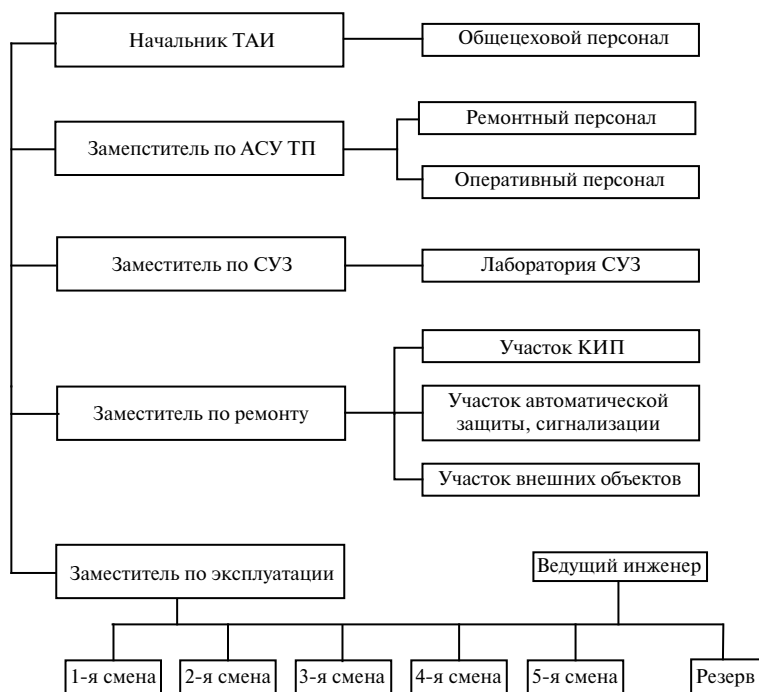


Рис. 1.3. Типовая структура цеха тепловой автоматики и измерений:

СУЗ — стержни управления и защиты; КИП — контрольно-измерительный прибор; ТАИ — тепловая автоматизация измерений

ется цех тепловой автоматики и измерений (ТАИ). Это — специализированное подразделение по обслуживанию приборов контроля и средств автоматизации атомной электростанции и других ядерных установок. Примерная структурная схема организации цеха ТАИ представлена на рис. 1.3.

В его задачи входят:

- техническое обслуживание и обеспечение бесперебойной работы приборов и средств автоматизации;
- ремонт оборудования;
- промышленное и опытное испытание новых образцов оборудования;
- разработка эксплуатационных инструкций и т.п.

Административно начальник цеха ТАИ подчиняется директору АЭС, а технически — главному инженеру. Дежурный персонал имеет двойную подчиненность: административно и технически — начальнику цеха ТАИ, а оперативно — начальнику смены АЭС. Персонал цеха подразделяется на эксплуатационную или дежурную (оперативную) и ремонтную группы.

Контрольные вопросы

1. Что такое метрологическое обеспечение?
2. В чем важность измерения температуры в реакторных установках?
3. В какую систему (подсистему) автоматизированной системы управления технологическим процессом энергоблока АЭС входят средства измерения температуры?
4. Температура каких узлов реакторных установок и как измеряется?
5. Дайте определение единства измерений.
6. Какой Закон РФ регулирует область измерений?
7. Чем обеспечивается единство измерений?
8. Каковы основные цели стандартизации в области температурных измерений?
9. Дайте понятия о техническом регулировании.
10. В чем ведении находятся вопросы обеспечения единства измерений в России?
11. Перечислите основные положения организации метрологической службы в Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».
12. Опишите структуру подразделений АЭС, занимающихся вопросами метрологии.

Глава вторая

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЯ НА РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ

2.1. Общие положения

2.1.1. Понятие о температуре

Температура является одной из семи основных физических величин в Международной системе единиц. Из них она — одна из четырех величин (еще масса, размер и время), непосредственно связанных с человеческой деятельностью. Вместе с тем существует некоторое затруднение в понимании и определении термина «температура», хотя с житейским восприятием этого термина проблем обычно нет.

Строгое определение понятия температуры в рамках классической термодинамики, описывающей поведение макроскопических систем, может быть дано на основе рассмотрения теплового равновесия в изолированной системе, не обменивающейся веществом с другими системами, но способной обмениваться с ними теплом. Если несколько систем находятся в тепловом равновесии друг с другом, существует единственный общий для всех этих систем параметр — температура.

Определение температуры как физической величины, вытекающее из первого и второго начал термодинамики, было предложено Кельвином:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

где Q_1 — количество теплоты в идеальной тепловой машине, поглощенной при температуре T_1 ; Q_2 — количество теплоты, отданное при меньшей температуре T_2 . Эта температура была названа термодинамической.

Не менее важным, хотя, может быть, менее понятным, является определение температуры, связанное с понятием энтропии S :

$$\frac{dQ}{T} = dS.$$

В рамках статистической механики температура определяется, как параметр состояния, обратно пропорциональный скорости изменения логарифма числа состояний (энтропии) — функции энергии при постоянном объеме V для системы:

$$\left(\frac{\partial S(U)}{\partial U}\right)_V = \frac{1}{T},$$

где U — внутренняя энергия.

Из статистических данных известно, что число возможных состояний $\Omega(E)$ всегда возрастает с ростом энергии E :

$$\frac{d\Omega(E)}{dE} > 0.$$

Сказанное выше относится к системам, находящимся в тепловом равновесии или в состоянии, достаточно близком к нему. Для неравновесных систем понятие температуры не имеет четкого определения. Более того, невозможно представить себе равновесную систему, состояние которой оставалось бы неизменным при произведении измерений. При любом способе измерения происходит нарушение состояния равновесия. Так, при применении термопреобразователей сопротивления происходит разогрев объекта током, протекающим через термосопротивление преобразователя, а также отток тепла по линиям связи. При использовании пирометра излучения нарушается требование полной замкнутости полости. При измерении давления происходит изменение объема системы и т.д.

Тем не менее, можно с определенной точностью принять, что в области малых скоростей изменения температуры существует тепловое равновесие.

Термодинамическая температура входит в ряд фундаментальных соотношений, играющих большую роль в температурных измерениях. Например, уравнение состояния газа и закон Кюри используются при построении термодинамической температурной шкалы, уравнение Найквиста — в шумовой термометрии, формула Планка — в пирометрии, уравнение Саха — в диагностировании плазмы.

1. Уравнение состояния идеального газа

$$pV = RT,$$

где p — давление; V — объем; R — газовая постоянная.

2. Закон Кюри

$$\mu = c/T,$$

где μ — магнитная восприимчивость парамагнитной соли; c — постоянный коэффициент.

3. Уравнение Найквиста, определяющее интенсивность тепловых шумов в активном электросопротивлении R

$$d^2U/d\nu^2 = 4hR\Delta\nu[\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1},$$

где h — постоянная Планка; $\Delta\nu$ — полоса частот, в которой наблюдаются флуктуации температуры; R — газовая постоянная; k — постоянная Больцмана.

Для высоких температур и низких частот ($h\nu \ll kT$) используют упрощенное уравнение

$$\overline{U}^2 = 4RkT\Delta\nu.$$

4. Формула Планка, определяющая интенсивность излучения с длиной волны λ абсолютно черного тела

$$E_{\lambda, T}^{\circ} = c_1 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1},$$

где c_1 и c_2 — постоянные.

5. Уравнение скорости звука в газе

$$v^2 = \gamma RT/M,$$

где M — молекулярная масса газа; $\gamma = c_p/c_v$ — отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме соответственно; R — газовая постоянная.

6. Уравнение Саха для степени термической ионизации газа α

$$\frac{\alpha}{1 - \alpha^2} = \frac{2g_i}{g_a} \left(\frac{2\pi m_e}{h^2} \right)^{3/2} \left(\frac{kT}{p} \right)^{5/2} e^{-E_i/kT},$$

где g_i и g_a — статистические массы ионизированных атомов и всех атомов; m_e — масса электрона; p — давление газа; E_i — энергия ионизации атомов.

2.1.2. Температурные шкалы

В измерительной технике известны различные шкалы, в которых проводятся измерения: шкалы наименования, порядка, разностей (интервалов), отношений. Они отражают развитие техники, совершенствование средств измерений. В термометрии используются следующие шкалы.

Шкалы качественных признаков:

1. **Наименования:** например, уровень температуры закали булата определялся по цветам побежалости. В этом случае такая шкала оказалось достаточной в давние времена для получения изделий высочайшего и непревзойденного доныне качества.

2. **Порядка:** в древнем Китае температура процесса обжига фарфора контролировалась по плавлению пирамидок, сделанных из шихты разного состава. Аналогичный метод и сейчас находит применение для контроля температуры, когда объект контроля недоступен для размещения других СИ температуры; применяются, например, термочувствительные краски, которые изменяют свой цвет в относительно узком температурном интервале.

Шкалы количественных признаков:

1. **Разностей (интервалов):** к ним относят шкалы Цельсия, Фаренгейта, Реомюра, нуль которых выбирался произвольно (случайно).

2. **Отношений:** это привязанная к абсолютному нулю шкала Кельвина (термодинамическая).

Применение тех или иных шкал имеет особенности при представлении погрешностей результатов измерений. Рассмотрим следующий пример. Пусть абсолютная погрешность измерения температуры составляет $\Delta = \pm 1$ °С. Относительная погрешность δ (%) измерения температуры кипения воды (100 °С) в разных шкалах будет иметь следующие значения:

Относительная погрешность	Шкалы		
	Цельсия	Кельвина	Фаренгейта
$\delta, \%$	1	0,27	0,85

Из табличных данных следует, что нецелесообразно приводить в относительной форме погрешность измерения температуры, выполненную в шкалах интервалов, как это пока еще встречается на практике. Когда иногда приводится относительная погрешность измерения температуры, к сожалению, не указывается температура или интервал температур, к которым относится эта погрешность. Заметим, что допустимые пределы отклонения температуры от номинальных статических характеристик, приводимые в стандартах, даются в абсолютной форме.

Практическая температурная шкала может быть построена на основе зависимости от температуры какого-либо измеряемого свойства. Однако опыт убеждает, что в природе не существует физических тел, свойства которых строго линейно зависят от температуры. Отсюда следует, что может существовать множество эмпирических

температурных шкал, основанных только на одном из возможных свойств. При этом шкалы могут совпадать друг с другом в некоторых точках и существенно расходиться в других. Например, шкалы, построенные на объемном расширении ртути и спирта, приведенные друг к другу в точках таяния льда и кипения воды, расходятся между собой в середине этого диапазона приблизительно на 2 К.

В истории метрологии известно большое количество температурных шкал, созданных различными исследователями. Эти шкалы, приведенные в табл. 2.1, свидетельствуют о внимании к температурным измерениям в разные времена.

Решение задачи о построении универсальной температурной шкалы было найдено на основе цикла Карно, по которому работает идеальная тепловая машина. Если принять положение об абсолютном температурном нуле как о первой опорной точке термодинамической температурной шкалы, то в качестве второй опорной точки может быть выбрана (и выбирается) температура тройной точки воды. Она представляет собой равновесную температуру сосуществования одновременно воды, льда и водяного пара. Значение $1/273,16$ -й части этого интервала принимают за единицу термодинамической температуры — кельвин (К). Часто реализуемая в практике температура таяния льда при стандартном атмосферном давлении на 0,01 К ниже температуры тройной точки.

В широко распространенной в настоящее время шкале Цельсия за нулевую точку принимается температура таяния льда, таким образом

$$T \text{ (K)} = t \text{ }^{\circ}\text{C} + 273,15.$$

Цельсий предложил за нулевую точку считать температуру кипения воды, а за 100° — таяния льда. Возможно, во времена Цельсия примерно 300 лет назад не были актуальны измерения температуры выше точки кипения воды. При этом любые температуры ниже этой точки имели положительные значения. Лишь через несколько лет шкала Цельсия физиком Штримером была перевернута с «головы на ноги» и в таком виде существует до сих пор.

В современной шкале Цельсия точное значение температуры кипения воды (при стандартной атмосфере) равно $99,973^{\circ}\text{C}$.

Необходимость создания международного эталона температуры была осознана уже в 1889 г., когда в качестве такого эталона была выбрана температура водородного газового термометра постоянного объема. Водород был выбран потому, что свойства водорода в диапазоне температур $-25 \div 100^{\circ}\text{C}$, актуальном в то время, мало отличаются от свойств идеального газа.

Таблица 2.1

Температурные шкалы

Автор шкалы	Термометрическая жидкость	Опорные точки	Выбор значения градуса	Соотношение с градусом Цельсия
Ньютон	Льняное масло	0° таяние льда; 34° — кипение воды	1/34 всей шкалы	1 °Н = 2,94 °С
Гук	Спирт	-7° — наибольший холод; +13° — наибольшее летнее тепло	Расширение спирта на 1/500	1 °Г = 2,4 °С
Фаренгейт	Спирт, ртуть	0° — температура смеси льда, воды и нашатыря; 212° — кипение воды	1/212 интервала*	1 °F = 5/9 °С
Реомюр	Спирт	0° — таяние льда; 80° — кипение воды	Расширение спирта на 1/10 00 объема	1 °R = 1,25 °С
Делиль	Ртуть	0° — кипение воды; 150° — таяние льда	Изменение объема ртути на 1/10 000	1 °Д = 0,667 °С
Ломоносов	—	0° — таяние льда; 150° — кипение воды	То же	1 °Л = 0,667 °С
Цельсий (первоначальный)	—	0° — кипение воды; 100° — таяние льда	1/100 интервала**	1 °С = 1 °С
Цельсий, Штрומר	—	0° — таяние льда; 100° — кипение воды	— То же	1 °С = 1 °С
Кельвин и др.	—	273,16 К — температура тройной точки воды	Термодинамическая 1 К = 1/273,16 температуры тройной точки воды	1 К = 1 °С
Ренкин	—	491,67 °Ra — температура таяния льда	Термодинамическая 1° Ra = 1° F	1° Ra = 5/9 °С

* Значение градуса шкалы не связаны со свойствами термодинамической жидкости.

** По последнему определению точка кипения воды исключена.

В дальнейшем создавались новые более достоверные температурные шкалы с расширяющимся температурным диапазоном. Результаты этих работ воплотились в создании и последующих уточнениях Международных практических температурных шкал — МПТШ (в 1927, 1948, 1968 гг.), принятых на международных конференциях как единственно правильные для того времени шкалы. Во всех случаях использовалась термодинамическая температурная шкала, в которой выражались все измеряемые температуры.

В настоящее время действующей является Международная температурная шкала (МТШ) 1990 г. [9].

При создании МТШ-90 были использованы:

- вещества реперных точек (табл. 2.2);

Таблица 2.2

Реперные точки по шкале МТШ-90

№ п/п	Реперная точка	Принятое значение температуры	
		К	°С
1	Давление гелия	3—5	–270,15 ÷ –268,15
2	Тройная точка водорода	13,8033	13,8033
3	Давление водорода	Примерно 17	Примерно –256,15
4	Давление водорода	Примерно 20,33	Примерно –252,85
5	Тройная точка неона	24,5561	–248,5939
6	Тройная точка кислорода	54,3584	–218,7916
7	Тройная точка аргона	83,8058	–189,3442
8	Тройная точка ртути	234,3156	–38,8344
9	Тройная точка воды	273,16	0,01
10	Точка плавления галлия	302,9146	29,7646
11	Точка затвердевания индия	429,7485	156,5985
12	Точка затвердевания олова	505,078	231,928
13	Точка затвердевания цинка	692,677	419,527
14	Точка затвердевания алюминия	933,473	660,323
15	Точка затвердевания серебра	1234,93	961,78
16	Точка затвердевания золота	1337,33	1064,18
17	Точка затвердевания меди	1357,77	1084,62

Примечания: 1. Температуры плавления и затвердевания даны для давления Па.

2. Температура гелия по п. 1 и водорода по пп. 3 и 4 определяется через давление по формулам, приведенным в материалах МТШ-90.

- приборы для измерений температуры, предназначенных для интерполирования значения температуры между реперными точками. В интервале температур 4,2—24,5561 К и 3—24,5561 К использовали газовый термометр, 13,8033—961,78 К — платиновый термометр сопротивления, выше этих температур монохроматический яркостный пирометр с учетом реперных точек серебра и золота (меди);

- интерполяционные формулы, в которых значения коэффициентов подбирали по температурным поддиапазонам, исходя из равенства температур и производных формул на границах соседних температурных участков;

- рекомендации по реализации реперных точек, обеспечивающих их высокую воспроизводимость, а также по требованиям к выбору интерполяционных приборов.

Кроме приведенных в табл. 2.2 17 *первичных* реперных точек существуют еще 25 реперных точек в интервале температур 24,546—3694,15 К. Эти реперные точки называются *вторичными* и используются только при проведении исследовательских и других работ.

В МПТШ-68, действовавшей до МТШ-90, первичных реперных точек было 12. Разница между температурами реперных точек по МТШ-90 и МПТШ-68 достигает почти 3 К для реперной точки кипения неона и 0,2 К — для плавления золота.

Все Международные практические температурные шкалы воспроизводились и воспроизводятся в институтах Госстандарта СССР и затем ФАТРИМ России. Опыт показал высокую воспроизводимость этих шкал во всех странах. Внедрение МТШ-90 в практику метрологических и промышленных предприятий России заняло почти 10 лет.

Каждое обращение к государственному эталону вызывает некоторые изменения его характеристик, поэтому единица размера температуры передается каждому нуждающемуся в поверке или калибровке СИ через рабочие эталоны и образцовые эталоны различных разрядов. В ряду эталонов других физических величин по точности эталон температуры находится на десятом месте после эталонов времени и частоты, длины, массы и др. Это объясняется сложностью определения температуры и тем, что воспроизведение температурной шкалы базируется на различных типах измерительных преобразователей.

Документ, который регламентирует требования к образцовым СИ и их соподчиненность в зависимости от требуемой точности градуировки, носит название поверочной схемы. Она зафиксирована в

ГОСТ 8.558—93 «Государственная поверочная схема для средств измерения температуры». Этот стандарт устанавливает назначение государственного первичного эталона единицы температуры — кельвина, комплекс основных средств измерений, входящих в его состав, основные метрологические параметры эталона и порядок передачи размера единицы температуры и т.д. Стандарт имеет три раздела, относящиеся к контактным термометрам в диапазонах температур 0,8—303 К и 0—2500 °С и к радиационным термометрам. К теме пособия относится раздел стандарта, описывающий требования к контактным термометрам в диапазоне 0—2500 °С. Схематическое изображение поверочной схемы приведено на рис. 2.1. Поверочная схема состоит из эталонов, образцовых средств измерений и рабочих средств измерений.



Рис. 2.1. Упрощенное изображение Государственной поверочной схемы для средств измерений температуры в диапазоне 0—2500 °С

В состав эталонов входят Государственный первичный эталон, эталон-копия, рабочие эталоны. Государственный первичный эталон температуры (ГПЭ) применяется для передачи размера единицы температуры эталону-копии и рабочим эталонам непосредственным сличением. Первичный эталон для температур от 0 до 3000 °С хранится в ВНИИМ (Санкт-Петербург), для температур ниже 0 °С первичный эталон хранится в ВНИИФТРИ (Московская обл.). Эталон-копия, хранящийся в СНИИМ (г. Новосибирск) применяется для передачи размера единицы температуры рабочим эталонам методом прямых измерений или градуировки. В качестве эталона-копии применяется аппаратура для воспроизведения реперных точек в диапазоне температур 0—1769 °С, платиновые термометры сопротивления в диапазоне 0—1085 °С. Рабочие эталоны применяются для поверки образцовых средств измерений 1-го разряда методом прямых измерений и градуировкой в реперных точках, высокоточных рабочих средств измерений — непосредственным сличением. В качестве рабочих эталонов используются платиновые термометры сопротивления, термоэлектрические термометры и аппаратура для воспроизводства реперных точек.

В настоящее время в различных организациях находятся шесть рабочих эталонов контактной термометрии и шесть рабочих эталонов бесконтактной термометрии (табл. 2.3). Отдельные предприятия и институты могут устанавливать у себя рабочие эталоны.

Образцовые средства измерений 1-го, 2-го разрядов применяются для поверки образцовых средств нижних образцовых средств и рабочих средств, 3-го разряда — рабочих средств.

Таблица 2.3

Место нахождения рабочего эталона температуры

Организация, город	Диапазон температур, °С	Состав эталона
РОСТЕСТ, Москва	0—1085	1, 2, 3, 4
ТЕСТ, Санкт-Петербург		
СНИИМ, г. Новосибирск		
УралТЕСТ, г. Екатеринбург		1, 2, 4, 5

Примечания: 1 — аппаратура для реализации реперных точек (тройная точка воды, точка плавления Ga, точка затвердевания In, Sn, Zn, Al, Ag, Cu. 2 — платиновые термометры сопротивления. 3 — мост для измерения сопротивления. 4 — высокотемпературные платиновые термометры сопротивления. 5 — установка для измерения сопротивления.

Рабочие средства измерений применяются для измерений температур поверхности, разности температур, а также при измерениях методом погружения.

Отметим, что название «образцовые средства измерений» соответствующих разрядов, в настоящее время заменено на «эталонные средства измерений» соответствующих разрядов. Такое название принято в российских и международных документах. Однако в обиходе термин «образцовые средства измерений» используется еще достаточно широко.

2.2. Средства измерений температуры

Поисками способов и СИ температуры человечество занималось лишь в средних веках. Развитие температурных измерений, по-видимому, следует отсчитывать с момента появления отпаянного спиртового термометра, создателем которого считается Великий герцог Тосканский Фердинанд Второй.

В научной и технической литературе используются различные названия первичных СИ температуры. Применительно к теме пособия это термоэлектрические преобразователи температуры, датчики температуры, термометры, термопреобразователи сопротивления, температурные сенсоры, термопары и пр. Для определенности и в соответствии со стандартами в эти термины следует вкладывать следующее содержание.

1. Термопара — это два проводника (термоэлектрода), генерирующие термоЭДС. Термосопротивление — металлическая проволока (обмотка), сопротивление которой изменяется в зависимости от температуры.

2. Термоэлектрический преобразователь (ТЭП) — измерительное устройство, состоящее из термопары, защитного чехла (защитной арматуры), материала, изолирующего термоэлектроды друг от друга и от защитного чехла, клеммной коробки. Аналогично термопреобразователь сопротивления — измерительное устройство, состоящее из термосопротивления, изоляции и защитной арматуры. Сигналы, вырабатываемые этими преобразователями, не воспринимаются непосредственно наблюдателями, они предназначены для обработки во вторичном преобразователе.

3. Термоэлектрический термометр (ТЭТ) — измерительное устройство, состоящее из ТЭП и вторичного преобразователя, преобразующего сигнал ТЭП в форму, воспринимаемую человеком.

Часто под термином «термопара» понимают и ТЭП, и ТЭТ. Кроме указанных встречаются такие термины, как «чувствительный элемент», «датчик» и «сенсор». Под чувствительным элементом в термометрии чаще всего понимают рабочий спай термопары или обмотку термопреобразователя сопротивления (термосопротивление). Понятие сенсор или датчик менее определенное, но часто используется для обозначения чувствительного элемента. Эти термины не рекомендуются для применения.

В некоторых случаях средство измерений переводится в разряд индикаторов. В ГОСТ Р 8.565—96 индикатор определяется как техническое устройство или вещество, служащие для установления наличия или отсутствия физической величины.

Для измерения температуры в ядерных энергетических установках используются только преобразователи термоэлектрические и сопротивления. Это связано с ответственностью измерений, высокой энергонапряженностью контролируемых узлов и агрегатов, действием на преобразователи специфических факторов — излучения, повышенных температур и расходов теплоносителя, больших сроков службы, коррозионного воздействия со стороны теплоносителя и т.п. В этих условиях резко ограничены возможности демонтажа средств измерений температуры для их поверки (калибровки) или для замены новыми преобразователями. Поэтому к преобразователям температуры предъявляются высокие требования по точности, надежности, ресурсу. По этим причинам и ряду других в реакторной термометрии не нашли применения полупроводниковые и пленочные датчики температуры.

2.2.1. Термоэлектрические преобразователи температуры

Принцип действия

Природа термоэлектричества в металлах может быть описана с помощью простейшей модели свободного электронного газа. В ней металл рассматривается, как жесткая решетка атомов, между которыми газ свободных электронов перемещается под воздействием электрических, магнитных и температурных полей. При наличии градиента температуры газ перемещается от горячего конца к холодному, передавая решетке часть своей кинетической энергии. В результате этого движения возникает избыток электронов в холодном конце проводника. Отрицательный заряд нарастает, пока не устанавливается динамическое равновесие между потоком электронов, движущихся под воздействием термического градиента от горячего конца к холодному, и потоком электронов, движущимся от

холодного конца к горячему под воздействием градиента электрического потенциала. Возникающий при этом суммарный градиент потенциала называется *термоэлектродвижущей силой* (термоЭДС).

Поскольку имеется сложная связь между энергией электронов и их рассеянием на колебаниях атомов в решетке, термоЭДС различных металлов отличаются друг от друга. Отсюда возникает возможность применения этого метода для измерения температуры, так как термопара состоит из двух различных проводников. Мерой температуры служит образующаяся разность потенциалов. Описанное явление носит название *эффекта Зеебека*.

Существуют еще два вида термоэлектрических явлений — эффекты Пельтье и Томсона. *Эффект Пельтье* проявляется при пропускании тока через спаянные между собой разнородные проводники и выражается в выделении или поглощении тепла в спае этих проводников в зависимости от направления тока. Эффект Пельтье используется в термометрии при создании термостатирующих устройств для поддержания температуры свободных (холодных) концов термопары при низком значении (обычно около 0 °С). *Эффект Томсона* состоит в выделении или поглощении тепла при пропускании тока через однородный проводник при наличии в нем градиента температуры.

Вернемся к рассмотрению эффекта Зеебека. При наличии градиента температуры в проводнике возникает электрическое поле, направленное навстречу градиенту температуры. Различие в числе электронов на концах проводника и ток в цепи существуют до тех пор, пока есть градиент температуры. Соответственно градиент потенциала электрического поля, собственно и являющийся термоЭДС, не может возникнуть без температурного градиента. Описанный механизм считается основной причиной возникновения термоЭДС и называется *диффузионной составляющей термоЭДС*. Она доминирует в чистых металлах при температурах выше температуры Дебая и является основной составляющей термоЭДС, возникающей во всем температурном диапазоне применения для сплавов, содержащих несколько процентов легирующих элементов.

Схема термопары приведена на рис. 2.2.

Значение термоЭДС $E_A(T)$, возникающей на однородном проводнике A , определяется

$$E_A(T) = \int_{T_1}^{T_2} S_A(T) dT,$$

где $S_A(T)$ — локальная чувствительность участка проводника.

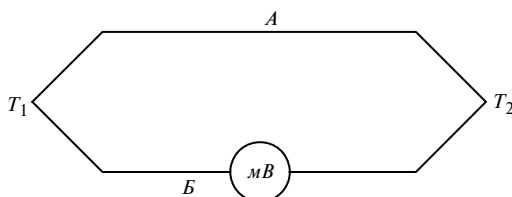


Рис. 2.2. Схема термопары

Из предыдущего выражения следует

$$S_A(T) = \frac{dE}{dT}.$$

Данная формула выражает абсолютный коэффициент Зеебека локального участка — физическую характеристику любого электропроводящего материала, которая не зависит от наличия других материалов в цепи.

Зависимость термоЭДС от температуры для термопары, состоящей из однородных термоэлектродов можно представить в интегральном виде:

$$E_{AB} = \int_{T_1}^{T_2} S_{AB}(T) dT. \quad (2.1)$$

Коэффициент Зеебека пары проводников A и B S_{AB} представляет собой разность коэффициентов Зеебека материала A и материала B :

$$S_{AB} = S_A - S_B.$$

Коэффициент Зеебека S_{AB} , характеризующий изменение E_{AB} в зависимости от температуры, называют также *коэффициентом термоЭДС*, *дифференциальной термоЭДС* или *чувствительностью термопары*. Для большинства пар металлов и сплавов S_{AB} имеет порядок $10^{-5} — 10^{-4}$ В/К. Приведенное уравнение справедливо, если проводники, образующие контур, однородны по своим физическим свойствам, термоЭДС не зависит от длины проводников, их сечения и удельного сопротивления. Именно в этом случае развиваемая термоЭДС зависит только от температуры мест контактов проводников. Однако так бывает не всегда, и далее, в п. 3.2.4, будут рассмотрены случаи, когда термоэлектрические свойства изменяются по длине проводника.

Уравнение (2.1) называют *уравнением термопары*. Из него видна возможность использования эффекта Зеебека для измерения температуры: если поддерживать один из спаев при постоянной температуре t_1 (для удобства равной 0°C), то измеряемая термоЭДС зависит лишь от температуры t_2 .

При использовании термоэлектрического метода для измерения температуры следует иметь в виду закономерности, которые формулируются в виде законов термоэлектрических цепей [3].

Закон промежуточных проводников. Основная формулировка этого закона гласит, что алгебраическая сумма термоЭДС в цепи, состоящей из любого количества различных металлов, равна нулю, если вся цепь находится при одинаковой температуре. Возможна и другая формулировка этого закона: термоЭДС в цепи из двух (или более) проводников A и B равна алгебраической сумме термоЭДС цепей, образованных третьим (и более) проводником C и проводниками A и B :

$$E_{AB}(T_1, T_2) = E_{AC}(T_1, T_2) + E_{BC}(T_1, T_2).$$

Закон промежуточных или последовательных температур. В цепи, состоящей из двух различных проводников A и B , температуры мест соединения которых неодинаковы и равны T_3 и T_1 , возникающая контура равна алгебраической сумме термоЭДС той же цепи при температурах контактов (спаев) T_3 и T_2 , T_2 и T_1 . Это положение может быть распространено на большее количество проводников.

Закон однородного контура (закон Магнуса). В замкнутом однородном проводнике при любом распределении температуры в нем не возникает электрического тока. Отсюда следует, что в цепи, состоящей из двух различных проводников, каждый из которых однороден, и спаи которых имеют температуру T_1 и T_2 , термоЭДС не зависит от распределения температуры вдоль проводников, а определяется лишь температурами спаев.

Эти основные законы термоэлектрических цепей имеют большое значение для термометрии. Из них следуют важные для практики выводы:

- если известны значения термоЭДС металлов относительно какого-нибудь общего металла (например, платины), термоЭДС любой пары этих металлов можно получить, вычислив разность термоЭДС этих металлов относительно общего металла;
- термоЭДС в замкнутой цепи из различных проводников, находящихся при одинаковой температуре, равна нулю;

- термоЭДС термопары не изменяется, если в разрез любого проводника при одинаковой температуре поместить ряд проводников из других металлов;

- если температуры на концах третьего проводника (например, измерительного прибора) не равны, то к термоЭДС термопары прибавляются или вычитаются термоЭДС между термоэлектродами термопары и третьим проводником, обусловленные разностью температур.

Из этих выводов следует, что вторичный прибор можно подключать к термопаре с помощью проводов из другого металла, если температуры мест контактов проводов и термоэлектродов термопар одинаковы. Однако при этом следует помнить, что термоЭДС, развиваемая термопарой, соответствует температурам рабочего спая и мест контакта проводов и термоэлектродов термопары.

Устройство термоэлектрических преобразователей

При огромном разнообразии термоэлектрических преобразователей их конструкции схожи между собой (рис. 2.3). Основная часть термоэлектрического преобразователя — термоэлектроды. Они отделены друг от друга и от защитного чехла электрической изоляцией. Рабочий спай преобразователя может иметь три исполнения:

- совместное с металлическим защитным чехлом, выполняемое совместной сваркой термоэлектродов и чехла;
- электрически полностью изолированное от металлического чехла;
- раздельное, у которого спай и чехол совместно не свариваются, но и не изолируются специально друг от друга. Требования к электросопротивлению между чехлом и рабочим спаем термопарой не предъявляются.

В некоторых литературных источниках различают только первые два типа исполнений. Каждое исполнение имеет свои преимущества и недостатки. Так, совместный спай имеет наименьшую тепловую инерцию. Однако зона совместной сварки термоэлектродов и чехла

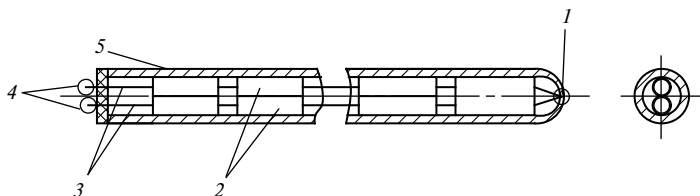


Рис. 2.3. Схема термоэлектрического преобразователя:

1 — рабочий спай; 2 — электроизоляционные бусы; 3 — термоэлектроды; 4 — контакты; 5 — защитный чехол

обычно образована оплавлением разнородных металлов (сплавов). По этой причине это наиболее слабое место в конструкции термопары, как с точки зрения механических свойств, так и устойчивости в коррозионно-активной среде. Изолированный спай имеет большую тепловую инерцию. Он применяется, когда возникает потребность в гальванической развязке термоэлектродов и массы. Изолированный спай более однороден по составу. Раздельный спай занимает промежуточное положение.

Обычно в преобразователях располагают пару термоэлектродов. Однако для повышения надежности измерения иногда применяют три и более термоэлектродов (см. п. 4.2.2).

Изоляция термоэлектродов друг от друга и от защитного чехла осуществляется с помощью бус или соломок (одноканальных, двухканальных или многоканальных) из изолирующего материала — фарфора, оксидов магния, алюминия, бериллия и пр., а также с помощью изолирующих покрытий из разных материалов.

подавляющее большинство преобразователей имеет чехол, назначение которого состоит в защите термоэлектродов от внешней среды. Выбор материала чехла и его размеров (толщина стенки, диаметр, длина) определяется коррозионными свойствами внешней среды, ее параметрами (давление, температура и т.п.), особенностями применения. На конце чехла, противоположном рабочему спаю, монтируется головка, где осуществляется подсоединение термоэлектродов к удлинительным или компенсационным проводам, которые выводят сигнал к вторичному преобразователю, показывающему прибору. Иногда в головке размещается устройство для преобразования сигнала термопары в унифицированный сигнал постоянного тока: 0—5 мА и 4—20 мА, реже 0—20 мА. Зарубежные фирмы используют в основном сигнал 4—20 мА. Применяются также сигналы постоянного напряжения 0—5 В и 0—10 В. Головки могут иметь взрывобезопасное исполнение.

В качестве удлинительных проводов используются провода того же состава, что и термоэлектроды. Компенсационные провода имеют другой состав, но близкие к термоэлектродам термоэлектрические свойства. На практике чаще используются компенсационные провода, свои для каждой термоэлектрической пары. В табл. 2.4 приведены состав и характеристики компенсационных и удлинительных проводов для наиболее распространенных типов термопар. Для соединения термоэлектродов с проводами применяют различные соединительные колодки, штепсельные разъемы. Часто они сделаны из тех же термоэлектродных сплавов. Важно, чтобы зажимы колодок

Таблица 2.4
Цветовая маркировка, состав термоэлектродов и пределы допускаемых отклонений удлинительных и компенсационных термоэлектродных проводов в соответствии с требованиями МЭК 60584-3)

Номинальная статическая характеристика	Удлинительный провод		Компенсационный провод		Цветовая маркировка			Диапазон, °C	Пределы допускаемых отклонений	
	состав термоэлектродов	код	состав термоэлектродов	код	изоляция положительного электрода	изоляция отрицательного электрода	наружная оболочка		класс 1	класс 2
ЖК (J)	Fe/CuNi	Jx	—	—	Черная	Белая	Черная	-25÷200	±85 μV (±1,5 °C)	±140 μV (±2,5 °C)
	NiCr/NiAl	Kx	—	—	Зеленая	Белая	Зеленая	-25÷200	±60 μV (±1,5 °C)	±100 μV (±2,5 °C)
	—	—	Fe/CuNi	Kca	Зеленая	Белая	Зеленая	0÷150	—	±100 μV (±2,5 °C)
XA (K)	—	—	Cu/CuNi	Kcb	Зеленая	Белая	Зеленая	0÷100	—	±100 μV (±2,5 °C)
	—	—	Cu/CuNi	Rca	Оранжевая	Белая	Оранжевая	0÷100	—	±30 μV (±2,5 °C)
	—	—	Cu/CuNi	Rcb	Оранжевая	Белая	Оранжевая	0÷200	—	±60 μV (±5,0 °C)
ПП (R)	—	—	Cu/CuNi	Sca	Оранжевая	Белая	Оранжевая	0÷100	—	±30 μV (±2,5 °C)
	—	—	Cu/CuNi	Scb	Оранжевая	Белая	Оранжевая	0÷200	—	±60 μV (±5,0 °C)
	Nicrosil/Nisil	Nx	—	—	Розовая	Белая	Розовая	-25÷200	±60 μV (±1,5 °C)	±100 μV (±2,5 °C)
НН (N)	—	—	—	—	Розовая	Белая	Розовая	-25÷200	±60 μV (±1,5 °C)	±100 μV (±2,5 °C)
ПР (B)	—	—	Cu/Cu	Bc	Серая	Белая	Серая	0÷100	—	±40 μV (±3,5 °C)
ВР 5/20	—	—	Cu/сплав МН-2,4	—	—	Белая	Синяя или голубая	0÷100	—	4,2 °C

и разъемов под термоэлектроды и провода имели одинаковую или близкую температуру.

В РФ нет стандарта, описывающего требования к таким соединительным устройствам, однако американским обществом по испытанию материалов (ASTM International) было принято два стандарта:

- E1129/E1129M—98(2002) «Типовые технические условия для соединительных устройств для термопар»;
- E1684-00 «Типовые технические условия для малогабаритных соединительных устройств для термопар».

Международная электротехническая комиссия ИЕС (МЭК) также включила требования к соединительным устройствам в последнюю редакцию стандарта МЭК 584-3 — 2007.

Преобразователи бывают однозонные и многозонные. В многозонном преобразователе по длине располагаются несколько рабочих спаев. Иногда в таком преобразователе имеется один общий термоэлектрод (например, из хромеля), к которому по длине с определенным шагом привариваются другие термоэлектроды (например, алюмелевые, см. п. 4.2.2).

Эквивалентная электрическая схема термоэлектрического преобразователя представлена на рис. 2.4. Видно, что, несмотря на внешнюю простоту преобразователя, он имеет достаточно сложную электриче-

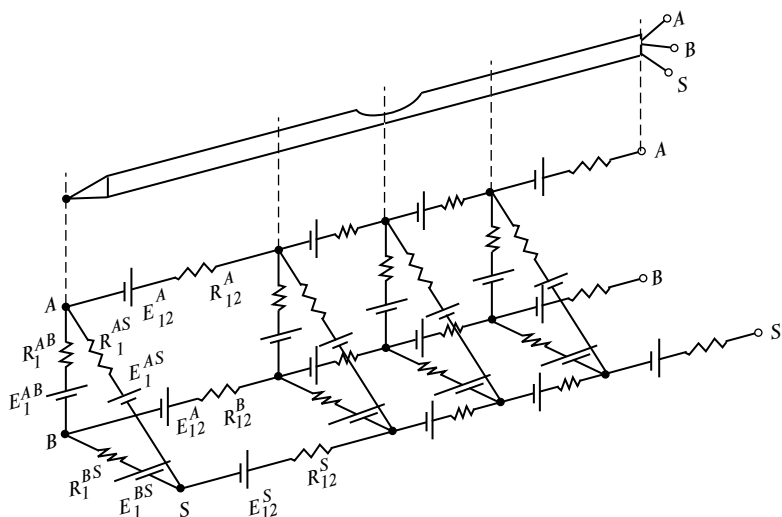


Рис. 2.4. Эквивалентная схема термоэлектрического преобразователя:

A, B — термоэлектроды; S — защитный чехол; R — сопротивления электродов, изоляции, чехла; E — термоЭДС и паразитные термоЭДС

скую схему. Ее каждый элемент — сопротивление электродов, сопротивление изоляции между электродами и между электродами и защитным чехлом, электрическая емкость между электродами и между электродами и чехлом и т.д. — может играть определенную роль в возникновении погрешностей измерения.

Микротермопары

Большое значение для изучения структуры температурных полей теплообменных аппаратов и других изделий атомной техники и для других целей имело создание так называемых микротермопар [10]. С их помощью были впервые измерены температурные поля в потоках воды и жидких металлов в трубах и в сложных моделях активной зоны ядерных реакторов. Это позволило создать оптимальные конструкции теплообменных аппаратов, активных зон, выявить факторы, влияющие на эффективность их работы. Такие термопреобразователи использовались для исследования процессов на штатном оборудовании контуров, активных зон, твэл АЭС. Создание микротермопар явилось прорывом в термометрии объектов как атомной техники, так и энергомашиностроения, авиационных и ракетных двигателей и т.п.

Первоначально микротермопары представляли собой капилляры из нержавеющей стали или тугоплавких металлов и сплавов с внешними диаметрами 0,3, 0,5 и 0,8 мм. Внутри капилляров размещались стандартные термоэлектроды (ХА, ХК, ПП, ВР) с нанесенным электроизолирующим покрытием из алунда. Алунд (электрокорунд) — искусственный материал, состоящий в основном из α -фазы оксида алюминия Al_2O_3 с добавками оксидов металлов (Ti, Ca, Fe). Для более компактного размещения электродов капиллярам в сечении придавалась эллипсная форма. Это предохраняло алунд от осыпания. В качестве изоляции использовались также кремнийорганические покрытия и покрытия из температуростойких лаков и композиций. Микротермопары из капилляров (капиллярные термопары) достаточно гибки и позволяли изгибать капилляр под углом 90° на небольшом радиусе. Длины микротермопар обычно определялись длинами имеющихся в наличии капиллярных трубок.

Впоследствии капиллярные микротермопары были практически полностью заменены на кабельные термопары. Капиллярные микротермопары пока остаются там, где отсутствует производство соответствующего термопарного кабеля. Так, в России массово не производится термопарный кабель с платиносодержащими и вольфрамиевыми термоэлектродами.

Кабельные термоэлектрические преобразователи

Одним из распространенных видов термоэлектрических преобразователей являются кабельные преобразователи (рис. 2.5). Он представляет собой гибкую металлическую трубку с размещенными внутри нее одной или двумя парами термоэлектродов, расположенных параллельно друг другу (рис. 2.6).

Пространство вокруг термоэлектродов заполнено уплотненной мелкодисперсной минеральной изоляцией (обычно оксидом магния MgO или алюминия Al_2O_3 с чистотой не менее 96 %). Плотность набивки превышает 99 %. Термоэлектроды кабельной термопары со стороны рабочего торца свариваются между собой, образуя рабочий спай внутри стальной оболочки. Рабочий торец заглушается приваренной стальной пробкой. Возможно также просто оплавление конца трубки совместно с термоэлектродами или отдельно от них. Свободные концы термоэлектродов подключаются к клеммам головки термопреобразователя или компенсационным (удлинительным проводам) проводам.

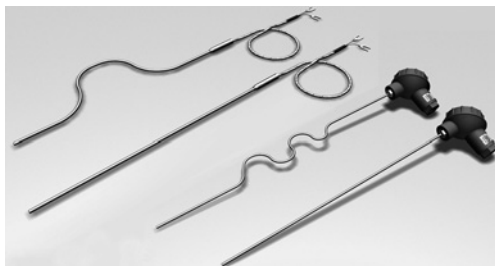


Рис. 2.5. Общий вид кабельных термоэлектрических преобразователей

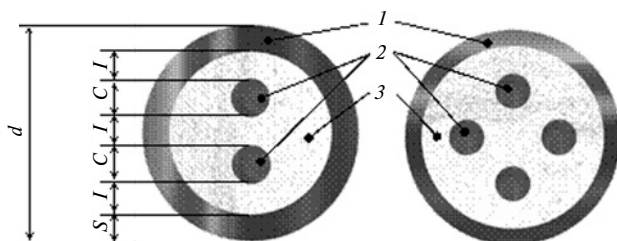


Рис. 2.6. Термopарный кабель с одной и двумя парами термоэлектродов:

1 — защитные оболочки; 2 — термоэлектроды; 3 — минеральная изоляция (MgO); d — внешний диаметр защитной оболочки; S — толщина защитной оболочки; C — диаметр электрода минимальный; l — толщина изоляции минимальная

В соответствии со стандартом Международной электротехнической комиссии МЭК 61515 «Термопары и термопарные кабели с минеральной изоляцией» кабельные термопары производят наружным диаметром от 0,5 до 8,0 мм с термоэлектродами образующими термопару типов Т, J, Е, К, N с номинальной характеристикой соответствующей стандарту МЭК 584-1.

Высокая плотность изоляции кабельного преобразователя позволяет навивать его на цилиндр радиусом, равным пятикратному диаметру кабеля, без изменения технических характеристик термопары. Изготовителем кабеля в России является завод «Кирскабель». Размеры кабеля, изготавливаемого на этом заводе, даны в табл. 2.5. Длины кабеля составляют до несколько сотен метров. Термоэлектроды производят из материалов ХА, ХК. По отдельному заказу изготавливаются термопарные кабели с термоэлектродами из нихросил-нисила (НН). В качестве материалов оболочек кабеля используют сталь типа Х18Н10 или сплав ХН78Т. Номенклатура отечественных кабелей мала по сравнению с номенклатурой иностранных производителей термопарных кабелей. За рубежом изготавливают термопарный кабель с термоэлектродами любых типов: К, N, J, Т, Е, S и т.п., с различными оболочками из: стали AISI 304, 310, 316, 321, сплавов Inconel 600 и 601, Alloy 740, платинородиевые и т.п. (табл. 2.6). Целесообразно иметь материал оболочки подобный материалу термоэлектродов. Это снимает проблемы, связанные с их разным термическим расширением.

Таблица 2.5

Размеры термопарного кабеля производства завода «Кирскабель»

Количество и площадь поперечного сечения жил, мм ²	Диаметр кабеля, мм	Диаметр термоэлектрода, мм	Толщина оболочки, мм	Толщина изоляции, мм
2×0,02	1,0	0,15	0,15	0,13
2×0,06	1,5	0,27	0,25	0,15
2×0,3	3,0	0,65	0,35	0,33
2×0,5	4,0	0,85	0,55	0,40
2×0,6	5,0	0,90	0,65	0,63
2×0,9	6,0	1,08	0,85	0,71
4×0,44	4,6	0,75	0,35	0,61
4×1,13	7,2	1,20	0,55	0,94

2.2. Средства измерений температуры

Таблица 2.6

Параметры кабелей в соответствии с МЭК 61515

Внешний диаметр кабеля (d), номинальный \pm допуск, мм	Толщина оболочки (S) минимальная, мм	Диаметр электрода (C) минимальный, мм	Толщина изоляции (I) минимальная, мм
$0,5 \pm 0,025$	0,05	0,08	0,04
$1,0 \pm 0,025$	0,10	0,15	0,08
$1,5 \pm 0,025$	0,15	0,23	0,12
$2,0 \pm 0,025$	0,20	0,30	0,16
$3,0 \pm 0,030$	0,30	0,45	0,24
$4,5 \pm 0,045$	0,45	0,68	0,36
$6,0 \pm 0,060$	0,60	0,90	0,48
$8,0 \pm 0,080$	0,80	1,20	0,64

Примечание. AISI 321, AISI 316, AISI 304, AISI 310, AISI 446, Inconel™ 600, Alloy 740 и другие — материалы оболочек кабелей.

Преимуществом кабельных преобразователей являются их высокие механические свойства: гибкость, устойчивость к тепловым ударам, вибрациям, механическим воздействиям. Термоэлектроды внутри кабеля защищены от воздействия внешней атмосферы. Рабочая часть преобразователя, изготовленного из термопарного кабеля, с помощью специальных устройств может принимать различные поперечные сечения: плоское, овальное, полукруглое, прямоугольное и т.п. Это облегчает монтаж преобразователей в самых разнообразных условиях.

Преобразователи могут иметь переменное, ступенчато изменяющееся по длине сечение (рис. 2.7). Специальная технология позволяет уменьшать внешние диаметры преобразователей со стороны рабочего спая до 0,3 и даже до 0,1 мм при исходных диаметрах кабеля 3, 1,5 и 1 мм. Такая конфигурация дает возможность осуществлять трассировку узкой части преобразователей в особо узких зазо-

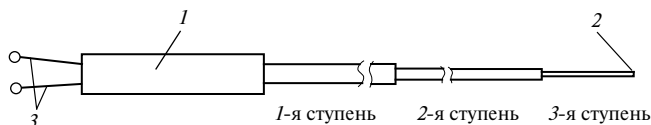


Рис. 2.7. Кабельная термопара переменного по длине сечения:

1 — удлинительная головка; 2 — рабочий спай; 3 — удлинительные провода

рах и щелях. Остальная, бóльшая по длине часть преобразователя может иметь бóльший диаметр, следовательно, меньшее электросопротивление и более высокую механическую прочность.

Кабельные преобразователи в России стандартизованы ГОСТ 23847—79 «Преобразователи термоэлектрические кабельные типов КТХАС, КТХАСп, КТХКС». В соответствии с этими стандартами участок преобразователя должен выдерживать один цикл изгиба на угол 180° вокруг цилиндра диаметром в пять внешних диаметров кабеля. Преобразователи герметичны в воде и жидких металлах, виброустойчивы, способны выдерживать внешнее давление не менее 20 МПа; есть примеры их использования при давлении более 50 МПа.

В настоящее время термопарный кабель широко используется при изготовлении термоэлектрических преобразователей общепромышленного и взрывобезопасного исполнений (производственная компания «Тесей», г. Обнинск). Работоспособность кабельных термопар зависит от электрического сопротивления изоляции, которое в свою очередь зависит от ее влажности. Поэтому при разгерметизации чехла преобразователя вода или жидкий металл, проникающие внутрь чехла, практически выводят из строя термопару. Разрыв внешней оболочки — чехла изнутри и разгерметизация кабельной термопары могут возникать вследствие недостаточной просушки изоляции внутри кабеля от влаги.

Опыт использования преобразователей из термопарного кабеля показывает так же, что они имеют более стабильные метрологические характеристики, что объясняется их более надежной защитой от воздействия внешней среды.

Резюмируя все вышесказанное о кабельных термопарах, можно подчеркнуть их основные достоинства:

- более высокие термоэлектрическая стабильность и рабочий ресурс по сравнению с проволочными термопреобразователями (в 2—3 раза);
- возможность изгиба, монтажа в труднодоступных местах, в кабельных каналах. При этом длина термообразователя может достигать нескольких сотен метров. Термопары можно приваривать, припаивать или просто прижимать к поверхности для измерения ее температуры;
- универсальность применения для различных условий эксплуатации, хорошая технологичность, малая материалоемкость;
- способность выдерживать большие рабочие давления;
- возможность использования в агрессивных средах, например в жидкометаллических теплоносителях;

- изготовление на их основе термопреобразователей в защитных чехлах блочно-модульного исполнения, обеспечивающих дополнительную защиту термоэлектродов от воздействия рабочей среды и создающих возможность оперативной замены термочувствительного элемента.

Преобразователи из кабеля с малым диаметром чехла имеют малую тепловую инерцию, что позволяет их использовать при исследовании быстропротекающих процессов.

Термопары с жидкометаллическим электродом

Из природы термоЭДС видно, что она может возникать как в твердых, так и в расплавленных металлах. Это позволяет создать для измерения температуры жидкометаллических теплоносителей ядерных реакторов термометрическое устройство с уникальными метрологическими характеристиками. Принцип действия устройства понятен из рис. 2.8. При наличии разных температур в местах размещения электродов возникает термоЭДС пары «жидкий металл — материал трубы». Термоэлектрическая цепь состоит из участка жидкого металла (например, натрия), электродов, с помощью которых снимается термоЭДС, и участка трубопровода, шунтирующего термоЭДС. Значение термоЭДС определяется разностью температур в местах размещения электродов и термоэлектрическими свойствами пары «жидкий металл—сталь». На рис. 2.9 представлена зависимость термоЭДС пары «натрий — сталь» 1Х18Н10Т от температуры. ТермоЭДС этих металлов достаточно велика: например, для этой пары она расположена между термоЭДС стандартных пар ХА и ПП. Представленная на рисунке зависимость относится к конкретному образцу использованной стали. Для другого образца той же марки зависимость может в той или иной степени отличаться из-за небольшого различия в составе.

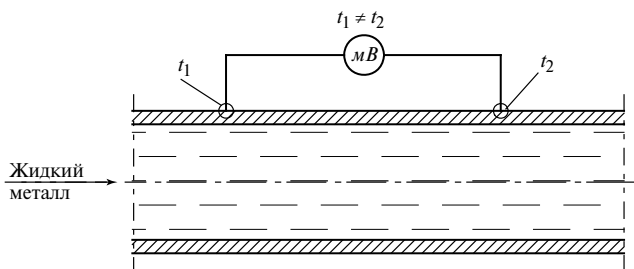


Рис. 2.8. Термопара с жидкометаллическим электродом

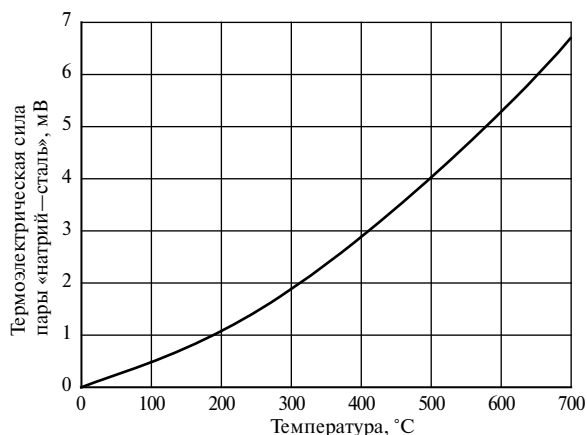


Рис. 2.9. Термоэлектродвижущая сила пары «нержавеющая сталь—натрий» при температуре холодных спаев 0 °C

Целесообразно, хотя и не обязательно, электроды для этих термопар изготавливать из того же материала, что и трубопровод. В противном случае в цепи возникает дополнительная термоЭДС пары «труба—электрод», которая не обнаруживается в стационарных условиях и при близости температур контактов «труба—электрод» и «труба—жидкий металл», но может сказаться при нестационарных измерениях температуры.

Уникальность термопары «жидкий металл—сталь» состоит в том, что источник термоЭДС в ней расположен на поверхности трубы, т.е. практически в самом жидком металле. В обычных термопарах источник термоЭДС отделен от контролируемой среды стенкой защитной арматуры, изоляцией, газовыми зазорами и т.п. По этой причине тепловая инерция термопар «жидкий металл—сталь» на несколько порядков меньше, чем термопар с защитным чехлом. Поэтому такие термопары могут с успехом использоваться для контроля быстропротекающих тепловых процессов в натриевых быстрых реакторах. Такие термопары возможны не только в натриевых, но и в других жидкометаллических контурах. Вместо стали может быть использован любой другой металл или сплав, развивающий подходящую термоЭДС.

Возникновение аналогичной по характеру термоЭДС возможно и в водяных системах. В этом случае термоЭДС зависит не только от температуры, но и от химического состава воды. Однако сведения о характеристиках таких термопар в технической литературе отсутствуют.

Компенсация температуры холодных спаев

Для удобства измерения температуры холодные спаи термоэлектрических преобразователей целесообразно располагать при температуре 0 °С в термостате с тающим льдом. Это и делается обычно при экспериментальных исследованиях. Однако в условиях массовых измерений температуры на производстве, например на АЭС, такой метод неудобен. В этом случае производится компенсация температуры холодных спаев, температура которых близка к комнатной температуре. Известны два способа такой компенсации:

- температуру свободных концов в компенсационном устройстве поддерживают при постоянной и известной температуре;
- измеряют температуру, при которой находятся свободные концы термопар с помощью отдельного прибора, эта температура может изменяться в небольших пределах.

В каждом случае к сигналу, развиваемому термопарой, прибавляют значение измеренной постоянной или изменяющейся термоЭДС, соответствующей температуре свободных концов. При этом должна учитываться нелинейность зависимости термоЭДС термопары от температуры.

В системе внутриреакторного контроля энергетических реакторов используется второй способ. Для измерения температуры свободных концов в нем применяют платиновый термопреобразователь сопротивления второго класса допуска (класса допуска В), включенный по четырехпроводной схеме, с индивидуальной калибровкой, обеспечивающей погрешность измерения 0,15—0,25 °С. Для поддержания этой погрешности проводится поверка термопреобразователя в метрологической лаборатории не реже 1 раза в год. Достаточно массивная конструкция устройства обеспечивает равномерное температурное поле в зоне размещения свободных концов и термопреобразователей сопротивления с погрешностью менее 0,25 °С. Устройство размещено на патрубках крышки реактора, свободные концы термопар входят в компенсационное устройство без применения компенсационных проводов. Это делается для того, чтобы линия от первичного преобразователя была короче, и дополнительные паразитные термоЭДС на этой линии были меньше.

Термостатирование устройства обеспечивает достаточно медленное изменение температуры — его постоянная времени равна приблизительно 2 ч.

Компенсационное устройство сохраняет работоспособность при воздействии пароводяной смеси при температуре 100 °С, нейтронного и γ -облучения, орошения водой, содержащей борную кислоту.

2.2.2. Термопреобразователи сопротивления

Термопреобразователь сопротивления — устройство, состоящее из чувствительного элемента — термосопротивления, электрической изоляции, защитной оболочки (чехла), внутренних соединительных проводов и внешних выводов, позволяющих осуществить подключение к вторичному измерительному устройству. В состав поставки преобразователя могут быть включены установочные устройства и соединительные головки. Вторичный измерительный прибор вместе с термопреобразователем сопротивления называется *термометром сопротивления*. Чувствительный элемент называют иногда *термометрической вставкой*, которую можно применять отдельно или в составе термопреобразователя сопротивления.

В ГОСТ Р 8.625—2006 даны следующие определения:

- *термометр сопротивления (ТС)* — средство измерений температуры, состоящее из одного или нескольких термочувствительных элементов сопротивления и внутренних соединительных проводов, помещенных в герметичный защитный корпус, внешних клемм или выводов, предназначенных для подключения к измерительному прибору. В состав термометра сопротивления могут конструктивно входить связанные с ним монтажные и коммуникационные средства;
- *чувствительный элемент термометра (ЧЭ)* — резистор, выполненный из металлических проволоки или пленки с выводами для крепления соединительных проводов.

Проволока или пленка имеют известную зависимость электрического сопротивления от температуры. Еще раз отметим, что пленочные конструкции ТС в ядерных установках не применяются.

Принцип действия термопреобразователя сопротивления

Простейшее объяснение явления электропроводности металлов в теории электронного газа заключается в следующем.

Электронный газ в металле ускоряется под действием электрического поля напряженностью E . В промежутках между двумя столкновениями электрона с атомами в решетке металла электрон испытывает ускорение eE/m . Время его свободного пробега равно l/v , где e и m — заряд и масса электрона, l и v — длина свободного пробега и скорость движения электрона. Произведение ускорения на среднюю длительность свободного пробега есть дополнительная скорость электрона в направлении приложенного электрического поля

$$U_e = \frac{eEl}{mv}.$$

Средняя скорость движения электрона равна половине этой величины. Плотность электрического тока, возникающего под воздействием электрического поля, равна

$$j = \frac{1}{2} U_e e n = \frac{n e^2 l}{2 m v} E,$$

где n — число электронов в единице объема.

Таким образом, плотность тока пропорциональна напряженности электрического поля (закон Ома). Коэффициент пропорциональности (электропроводность)

$$\sigma = \frac{n e^2 l}{2 m v}.$$

Длина свободного пробега в теории электронного газа обратно пропорциональна коэффициенту рассеяния электронов μ . Рассеяние электронов происходит на тепловых флуктуациях решетки металла. При температурах, незначительно превышающих дебаевскую, коэффициент рассеяния μ пропорционален температуре T . При более высоких температурах вследствие влияния теплового расширения появляется дополнительный член, пропорциональный T^2 . Таким образом, электрическое сопротивление металлов при не очень высоких температурах описывается зависимостью

$$\rho_T = a + bT + cT^2,$$

где a, b, c — эмпирические коэффициенты.

Причиной рассеяния электронов являются также растворенные в металле примеси и другие компоненты, вследствие чего появляется примесная часть электросопротивления ρ_C . В соответствии с правилом Матиссена при небольших концентрациях примесей она не зависит от температуры и пропорциональна концентрации примеси C . Тогда полное сопротивление

$$\rho = \rho_T + \rho_C \approx \rho_T + aC.$$

Зависимость сопротивления от температуры для платинового термопреобразователя в интервале температур 0—630 °C описывается квадратичным уравнением. Для температур ниже 0 °C уравнение более сложное:

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + C(t - 100)t^3],$$

где t — температура в градусах Цельсия, A, B, C — коэффициенты.

Сопротивление медных термопреобразователей описывается линейной зависимостью, никелевых — квадратичной.

Устройство термопреобразователя сопротивления

От термоэлектрических преобразователей температуры термопреобразователи сопротивления отличаются лишь устройством чувствительного элемента. Остальные узлы промышленных термопреобразователей сопротивления (защитная арматура, головка) практически не отличаются от таковых для термоэлектрических преобразователей.

Особенности чувствительных элементов термопреобразователей сводятся к следующему. Они изготавливаются из проволоки, обычно наматываемой на специальный изолирующий каркас бифилярно (рис. 2.10), чем устраняется влияние возможных магнитных полей. Платиновая проволока должна располагаться в изолирующем каркасе свободно, чтобы различные коэффициенты термического расширения проволоки и каркаса не приводили к возникновению напряжений в проволоке, вызывающих изменение электрического сопротивления. В некоторых конструкциях в пространстве, не занятом проволокой, располагаются геттеры — металлы для поглощения газов, выделяющихся из элементов конструкций при разогреве.

В качестве материалов каркаса для намотки проволоки используются естественная слюда (до 450 °С), искусственная слюда фторфлогопит (до 650 °С), кварц, алунд, фарфор для более высоких температур и т.п. В качестве материалов защитной арматуры используются стали и сплавы (те же, что и для термоэлектрических преобразователей), стекло, кварц и другие неметаллические материалы.

При изготовлении термопреобразователей сопротивления должно уделяться большое внимание отжигу намотанной проволоки для снятия упругих деформаций и напряжений, возникающих при намотке.

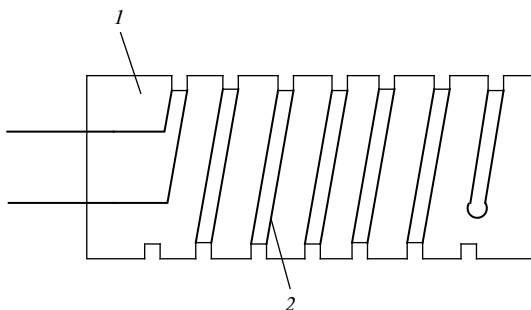


Рис. 2.10. Схема термопреобразователя сопротивления с бифилярной намоткой проволоки:

1 — изоляционная пластина; 2 — термочувствительная проволока

Отличительной особенностью термопреобразователей сопротивления является многопроводная схема их подключения к вторичному преобразователю, показывающему прибору (рис. 2.11). Возможны четырехпроводная схема подключения (два токовых вывода, два потенциальных), трехпроводная (один потенциальный и два токовых вывода, один из них используется также и как потенциальный) и двухпроводная. Более точной является конструкция с четырьмя проводами. В ней исключается влияние сопротивления подводящих проводов на результат измерения. В двухпроводной схеме необходимо учитывать электросопротивление подводящих проводов.

В преобразователях этого типа могут использоваться те же унифицированные сигналы, которые применяют в термоэлектрических преобразователях.

Государственными стандартами и Техническими условиями на технические термопреобразователи сопротивления (термометры сопротивления) для вновь изготовленных преобразователей устанавливаются допустимые отклонения R_0 — сопротивления при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и

отношения сопротивлений при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — $W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}$.

Однако в работе [11] показано, что целесообразнее формулировать требования к стабильности градуировочных характеристик, исходя из условия, что отклонение градуировки поверяемых преобразователей от градуировочных таблиц не должно превышать установленных значений. Это существенно уменьшает число забракованных при проверке преобразователей. В новом ГОСТ Р 8.625—2006 требование

к определенному значению величины $W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}$ отсутствует. В

этом стандарте оговаривается лишь то, что сопротивление термометра сопротивления во всем рабочем диапазоне температур должно укладываться в заявленный класс допуска.

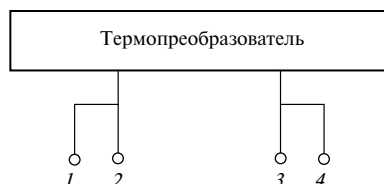


Рис. 2.11. Схема подключения термопреобразователя сопротивления:
1, 4 — потенциальные провода; 2, 3 — электрические провода

Погрешности термопреобразователей сопротивления имеют природу, отличающуюся от природы погрешностей термоэлектрических преобразователей. Физико-химические процессы, протекающие в чувствительном элементе термометров, вызывают нестабильность сопротивления и сопровождаются, в одних случаях, гистерезисом показаний, в других — необратимыми изменениями сопротивления.

Платина, несмотря на то, что она является благородным металлом, все же подвергается окислению с образованием оксида PtO_2 в поверхностном слое в интервале температур 40—300 °С, что приводит к увеличению сопротивления до $8 \cdot 10^{-4} \%$. Этот процесс наблюдается даже за счет следов кислорода в оболочке преобразователя. В интервале температур 300—400 °С происходит диссоциация этого оксида. При более высоких температурах — до 500 °С объемная окисная пленка растет тем быстрее, чем больше давление кислорода. При условиях, благоприятных для роста пленки, ее толщина может достигать 20 нм, что соответствует росту сопротивления на 0,04 %. При температурах выше 500 °С оксид разлагается. В целом, описанный процесс может привести к ошибке в измерении температуры до 0,3 К.

Другим источником нестабильности сопротивления платиновых элементов являются механические напряжения, возникающие при циклических изменениях температуры за счет различных коэффициентов теплового расширения материалов деталей преобразователя, а также при ударах и вибрации. Как правило, изменения сопротивления, вызванные этими явлениями, относительно невелики и вызывают погрешность в несколько милликельвинов, что имеет значение лишь для прецизионных термометров.

Технические преобразователи находятся в менее благоприятных условиях эксплуатации, чем прецизионные. Причинами их нестабильности являются механические напряжения, возникающие при эксплуатации, и загрязнение платины элементами, входящими в состав защитной арматуры. По данным [11] за 70 тыс. ч работы в диапазоне от –100 до 500 °С погрешность измерений платиновым термометром сопротивления достигала 0,5 К.

При невысоких температурах технические платиновые термопреобразователи сопротивления работают более стабильно: после 10 циклов нагрева до 235 °С с выдержкой в течение 24 ч нестабильность не превышала 0,05 К.

Термопреобразователи из неблагородных металлов — меди и никеля используют при более низких температурах, чем платиновые, из-за окисления до 200 °С для меди и до 150 °С для никеля. Разброс

исходных характеристик этих преобразователей, как показал анализ, выполненный доктором техн. наук П.П. Олейниковым, сильно зависит от вида и количества примесей в металлах чувствительных элементов, содержание которых часто не контролируется.

В литературных источниках встречается упоминание о вольфрамовом термопреобразователе сопротивления. Для его защиты от окислительной атмосферы применяют инертный газ высокой частоты. В качестве защитного чехла используется герметичная кварцевая оболочка. Этот тип преобразователя имеет небольшие габариты. Он может применяться для точных измерений высоких температур.

2.2.3. Вторичные преобразователи

В этом разделе даны основные представления о вторичных преобразователях сигналов, развиваемых термоэлектрическими преобразователями и термопреобразователями сопротивления. Более полное описание можно найти в монографиях [12, 13].

Вторичные преобразователи разделяют на две группы: аналоговые и цифровые.

Аналоговые вторичные приборы и преобразователи

Потенциометрический метод измерения. Суть метода ясна из четырехпроводной схемы, измерения сопротивления (рис. 2.12). С помощью потенциометра измеряется падение напряжения на термопреобразователе сопротивления R_T и на образцовом термопреобразователе сопротивления $R_{об}$. Сопротивление термопреобразователя рассчитывается по формуле

$$R_T = \frac{U_T}{U_{об}} R_{об},$$

где U_T и $U_{об}$ — падение напряжения на термопреобразователе сопротивления и на образцовом сопротивлении соответственно.

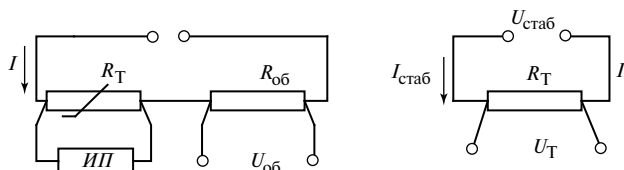


Рис. 2.12. Схема измерения потенциометрическим методом:
 а — при изменяемом токе; б — при стабилизированном токе

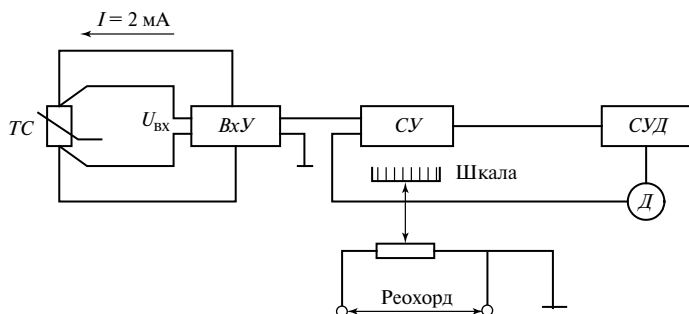


Рис. 2.13. Схема промышленного преобразователя:
ТС — термопреобразователь сопротивления

Такая схема, обеспечивающая наиболее точные измерения используется в некоторых промышленных приборах. Упрощенный вид схемы приведен на рис. 2.13. Преобразователь четырьмя проводами подключается к входному нормирующему усилителю ВхУ. По двум проводам подается стабилизированный ток 2 мА, двумя другими — напряжение $U_{\text{вх}}$ на усилитель. Напряжение после усилителя ВхУ поступает на суммирующий усилитель СУ. На него же поступает потенциал от движка реохорда. Разностный сигнал идет на СУД — схему управления шаговым двигателем D. Двигатель в зависимости от величины и знака разности перемещает движок реохорда до тех пор, пока эта разность не становится равной нулю, после чего двигатель останавливается. С движком реохорда жестко скреплена стрелка, показывающая значение температуры на шкале.

Мостовые методы измерения. Мостовые схемы являются одними из самых распространенных. На рис. 2.14 приведена элемен-

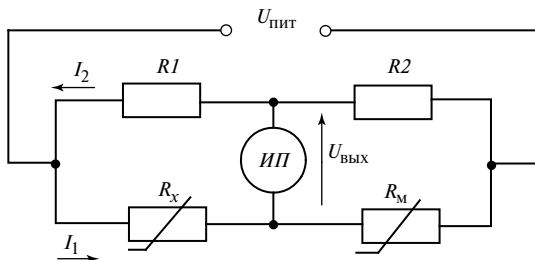


Рис. 2.14. Схема уравновешенного моста

тарная схема четырехплечего уравновешенного моста. Значение измеряемого сопротивления определяется по формуле

$$R_x = R_{\Pi} \frac{R_1}{R_2}.$$

Положительные качества такого моста определяются:

- независимостью результата измерения от напряжения источника питания (в определенных пределах);
- линейной зависимостью R_x от R_{Π} ;
- тем, что измерительный прибор выполняет только функцию чувствительного нуль-индикатора.

У лабораторных мостов такого типа класс точности достигает 0,005.

Для уменьшения влияния сопротивления подводящих проводов используется трехпроводная схема. На рис. 2.15 приведена упрощенная схема автоматического уравновешенного моста. В ней усилитель играет роль нуль-индикатора.

Схема неуравновешенного моста приведена на рис. 2.16. Приближенная зависимость выходного напряжения от R_x и постоянных сопротивлений плеч моста определяется формулой

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{пит}} \frac{R_x R_2 - R_1 R_3}{[(R_x + R_3)(R_1 + R_2)]}.$$

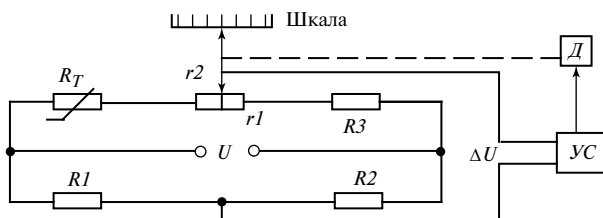


Рис. 2.15. Схема автоматического уравновешенного моста

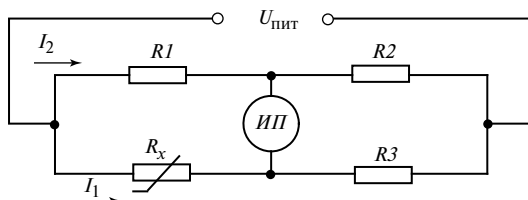


Рис. 2.16. Схема неуравновешенного моста

Логометр основан на применении магнитоэлектрической схемы измерения токов в двух рамках, расположенных в зазоре между полюсами постоянного магнита, жестко скрепленных друг с другом и со стрелкой (рис. 2.17). Электрическая схема логометра приведена на рис. 2.18. Отношение токов в рамках определяется соотношением

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_{p1} + R_2 + R_{л} + R_t}{R_{p1} + R_1 + R_{л}},$$

где $R_{л}$ — сопротивление линии.

Отсюда, если все сопротивления кроме термосопротивления постоянны,

$$\frac{I_1}{I_2} = \varphi(R_t) \quad \text{или} \quad \varphi = F(R_t),$$

где φ — угол поворота рамок и стрелки.

Таким образом, угол поворота не зависит от напряжения питания (в определенных пределах), а зависит только от значения изменяющегося термосопротивления.

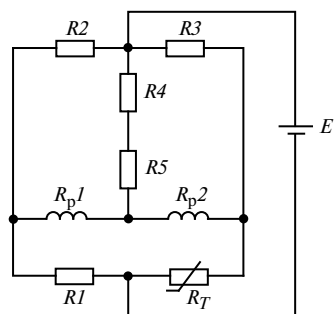
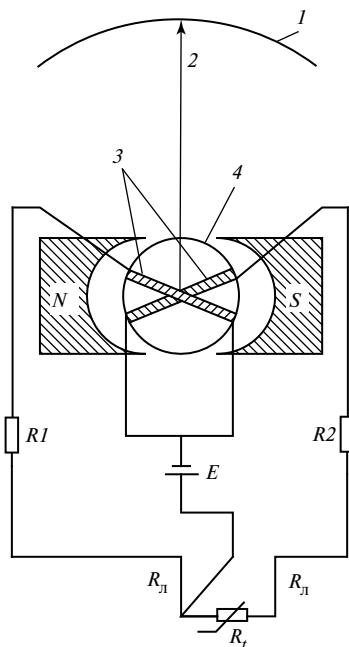


Рис. 2.18. Электрическая схема логометра

←

Рис. 2.17. Принципиальная схема логометра:

1 — шкала; 2 — стрелка; 3 — рамки; 4 — неподвижный сердечник

Термоэлектрические преобразователи

Пирометрический милливольтметр. Простейшим и достаточно точным средством измерения термоЭДС является прибор магнитоэлектрической системы. Электрическая схема такого прибора приведена на рис. 2.19. Основу схемы составляет мост, образованный теристорами R_1, R_2, R_3, R_4, R_M . Резисторы подбираются таким образом, чтобы мост был сбалансирован при температуре 0°C для термопар всех градуировок. Например, при температуре 600°C для термопар типа ХА напряжения $U_{ab} = 14,52\text{ мВ}$. На вход усилителя УС поступает сигнал

$$\Delta U = E(t, t_0) - U_{ab0},$$

где U_{ab0} — напряжение U_{ab} при 0°C .

К выходу усилителя подключен магнитоэлектрический милливольтметр.

Пирометры. Это одни из самых распространенных типов приборов для измерения термоЭДС. Лабораторные потенциометры имеют класс точности до 0,005 и используются при поверочных работах. В них реализуется компенсационный метод измерения. Упрощенная схема лабораторного потенциометра постоянного тока приведена на рис. 2.20. Схема состоит из трех контуров: A — рабочего тока; B — нормального элемента HE ; B — измеряемого сигнала $E(t, t_0)$. Высокостабильный источник напряжения — нормальный элемент используется для контроля значения рабочего тока при соответствующем положении K переключателя $П$. Установка тока производится с помощью резистора переменного сопротивления R_I . Рабочий ток считается установленным, если гальванометр $НП$ показывает отсутствие тока в цепи. После этого переключатель $П$ переводится в положение $И$. В этом положении, перемещая реохорд R_p , добиваются

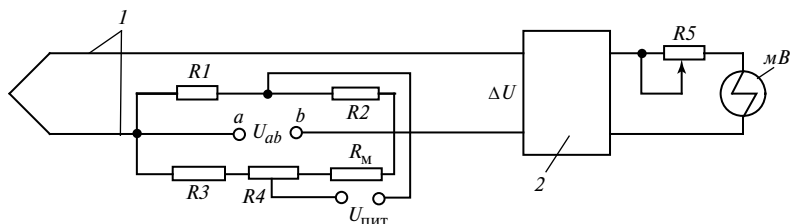


Рис. 2.19. Схема пирометрического милливольтметра Ш-4540:
1 — термозлектроды; 2 — усилитель

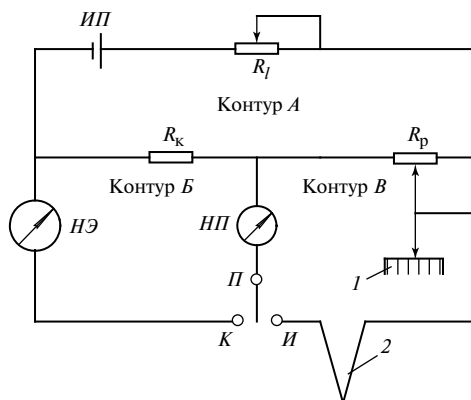


Рис. 2.20. Схема лабораторного потенциометра:
1 — шкала; 2 — термопара; R_K — контрольный резистор

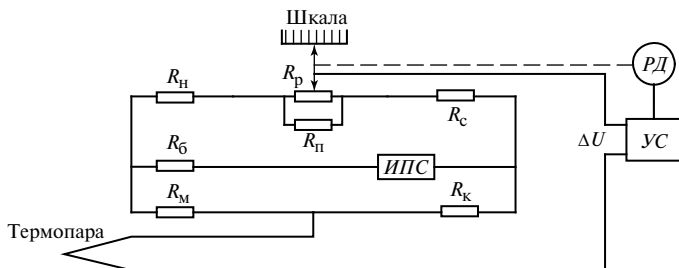


Рис. 2.21. Схема автоматического потенциометра:
 R_P — реохорд; $РД$ — реверсивный двигатель; $ИПС$ — стабилизированный источник тока; $УС$ — усилитель; R_H — резистор для установки начала шкалы; R_P — резистор, определяющий диапазон измерения; R_K — контрольный резистор для проверки рабочего тока 2 мА; R_M — медный резистор для введения поправки на изменение температуры свободных концов; R_C — резистор для установки рабочего тока 3 мА; $R_Б$ — нагрузочный резистор стабилизатора ИПС

отсутствия тока в гальванометре $НП$. Реохорд жестко связан со стрелкой, которая перемещается по шкале. Таким образом осуществляется измерение термоЭДС.

Разработаны автоматические потенциометры типа КСП. Его упрощенная схема представлена на рис. 2.21. В его состав входят источник стабилизированного тока $ИПС$, усилитель $УС$, реверсивный двигатель $РД$. В зависимости от величины и знака результирующей

щего сигнала реверсивный двигатель перемещает реохорд, пока сигнал не станет равным нулю.

Во всех приборах автоматического типа осуществляется коррекция показаний на изменение температуры холодных спаев термодпары.

Цифровые вторичные приборы и преобразователи

Цифровые измерительные приборы по сравнению с аналоговыми имеют ряд преимуществ, к которым относятся возможность автоматизации процесса измерения, малые габаритные размеры, удобство встраивания в цифровые информационные и управляющие системы, индикация сигналов в цифровой форме и т.п. Они имеют высокую помехозащищенность. Как и аналоговые, цифровые приборы бывают показывающими, регистрирующими, регулирующими. Существуют устройства многоканальной сигнализации (УМС). На рис. 2.22 приведена упрощенная структурная схема УМС, предназначенного для регистрации сигналов нескольких преобразователей температуры (термоэлектрических или сопротивления). Термопреобразователи сопротивления могут быть подключены по трех или четырехпровод-

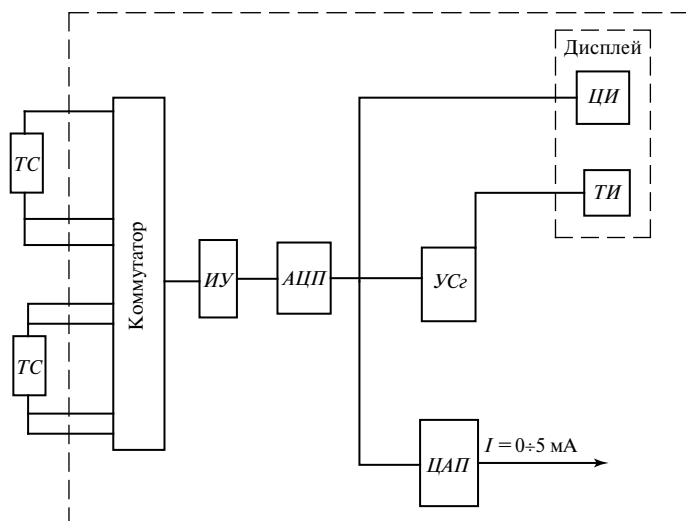


Рис. 2.22. Схема устройства многоканальной сигнализации температуры:

ТС — термометры сопротивления; *ИУ* — измерительный усилитель; *АЦП* — аналого-цифровой преобразователь; *УС_с* — устройство сигнализации; *ЦАП* — цифро-аналоговый преобразователь; *ЦИ* — цифровой индикатор; *ТИ* — технологическая информация

ной схеме. В одном устройстве могут быть использованы термоэлектрические преобразователи различных градуировок. На дисплее прибора могут высвечиваться результаты измерения сигналов первичных преобразователей, а также информация о срабатывании устройства сигнализации. Прибор может иметь отдельный выход в цифровой или аналоговой форме для его использования в управляющих системах.

Приборы этого типа имеют низкую погрешность измерения, однако в некоторых промышленных условиях высокая точность измерения термоЭДС и термосопротивления не реализуется из-за того, что погрешность первичных преобразователей может быть значительно больше, чем вторичных цифровых преобразователей.

2.2.4. Линии связи

Важным элементом систем контроля температуры являются линии связи между первичными и вторичными преобразователями температуры, усилителями сигнала и т.п. В их состав входят кабели, проходки и соединители [14]. Особенностью линий связи в реакторных установках являются ограниченное пространство, в котором прокладываются эти линии, близость к силовым электрическим цепям, воздействие тех же нагрузок, которые испытывают и сами преобразователи, в том числе радиационных, присутствие разъемов, переходников и проходок через прочный корпус реактора, заглушки твэл и т.п. Это приводит к возникновению помех в измерительных цепях, к повышению вероятности отказа линий. Возникающие в результате совместного действия этих причин погрешности могут достигать 2—4 °С — значений, достаточно ощутимых и превышающих допустимую погрешность, например при внутризонных измерениях в реакторах типа ВВЭР. Эти погрешности являются систематическими. Они могут быть учтены путем подачи на линии связи калиброванного сигнала и измерения его отклика.

На реакторах типа ВВЭР используются однопарные и многопарные кабели связи. Однопарные кабели содержат медную или хромель-алюмелевую (хромель-копелевую) пару. Многопарные кабели (семипарные и двенадцатипарные) имеют все медные пары или одну или несколько хромель-алюмелевых пар. Каждая пара имеет индивидуальный экран. Пары помещены в общий экран, который покрыт изолирующей оболочкой. Кабели имеют повышенную термостойкость (до 150 °С) и радиационную стойкость (до 10⁵ рад).

Соединители имеют герметичные латунные контакты с золотым покрытием.

Проходки в основном имеют стеклянный элемент, в котором герметично впаяны латунные проводники.

2.3. Материалы средств измерений температуры

2.3.1. Материалы термоэлектродов

Состав термоэлектродов, обозначения и другие характеристики наиболее распространенных, стандартизованных термопар (ГОСТ Р 8.585—2001) приведены в табл. 2.7. Следует отметить, что в этом стандарте нет никаких рекомендаций по возможному диапазону температур применения термопар, а лишь приведены справочные данные о величине термоЭДС. В стандарте ASTM E230-03 «Образцовые характеристики и таблицы электродвижущей силы (ЭДС) для стандартизованных термопар» даны рекомендации по температурным диапазонам в зависимости от диаметра термоэлектродов для проволочных термопар. Аналогичные рекомендации для кабельных термопар приведены в стандарте ASTM E608-00 «Типовые технические условия для термопар из обычных металлов в металлической оболочке, с минеральной изоляцией». В табл. 2.7 приведены данные с учетом вышеуказанных рекомендаций. Предельные температуры для большинства термопар указаны как температуры быстрого разрушения термоэлектродов термопар. Для термопар типа ВР приведены данные из ГОСТ Р 8.585—2001, поскольку в международных стандартах нет термопар с таким составом электродов. В зарубежных странах используются аналогичные термопары W3 %Re / W25 %Re и W5 %Re / W26 %Re, в отличие от российских W5 %Re / W20 %Re. В России данные термопары разделяют на группы А-1, А-2, А-3 ввиду того, что невозможно изготовить проволоку с постоянными характеристиками. Возможно, в будущем данные термопары будут заменены международными типами.

2.3.2. Конструкционные материалы

Рассмотрим материалы, используемые для защитных чехлов (защитной арматуры) термоэлектрических преобразователей и преобразователей термосопротивлений. Выбор материала зависит, главным образом, от среды, в которой используется СИ: от давления и температуры, от коррозионной активности этой среды. Имеют значение стоимость материала и его доступность. Следует также помнить о том, что защитная арматура должна быть совместима с термоэлектродами.

Таблица 2.7

Состав и обозначения термоэлектродов

Материал термоэлектродов, тип	Условное обозначение		Материал термоэлектродов		Диапазон измеримых температур при длительном применении, °С	Предельная температура при кратковременном применении, °С
	до 01.01.95 г.	с 01.01.95 г.	положительного	отрицательного		
Вольфрам-рений-вольфрам-рениевые, ТВР	ВР(А)-1	А-1	Сплав ВР-5 (95 %W + 5 %Re)	Сплав ВР-20 (80 %W + 20 %Re)	0—2200	2500
	ВР(А)-2	А-2			0—1800	
	ВР(А)-3	А-3			0—1800	
Платинородий-платинородиевые, ТПР	ПР(В)	В	Сплав ПР-30 (70 %Pt + 10 %Rh)	Сплав ПР-6 (94 %Pt+6 %Rh)	300—1600	1800
Платино-родий-платиновые, ТПП	ПП(С)	С	Сплав ПР-10 (90 %Pt + 10 %Rh)	Платина Пл Т(Рt)	0—1300	1600
	ПП (R)	R	Сплав ПР-13 (87 %Pt + 13 %Rh)	—	0—1300	1600
Никель-хром-никель-алюминиевые, (хромель-алюмелевые), ТХА	ХА (К)	К	Сплав хромель ТНХ9,5 (90,5 %Ni + 9,5 %Cr)	Сплав алюминель НМцАК 2-2-1 (94,5 %Ni+5,5 %Al, Si, Mn, Co)	–200 ÷ 1000	1300
Никель-хром-медь-никелевые (хромель-константановые) ТХК	ХК (Е)	Е	—	Сплав константан (55 % Cu + 45 %Ni, Mn, Fe)	–200 ÷ 700	900
Хромель-копелевые, ТХК	ХК (L)	L	—	Сплав копель МНМц 43-0,5 (56 %Cu + 44 %Ni)	–300 ÷ 600	800
Никель-хром-кремний-никель-кремниевые (никросил-никсильные) ТНН	НН (N)	N	Сплав никросил [(83,49—84,89) % Ni + (13,7— – 14,7) % Si + 0,15 %Fe + + 0,05 %C + 0,01 %Mg]	Сплав нисил [(94,98—95,53) % Ni + + 0,02 %Cr + (4,2—4,6) %Si + + 0,15 %Fe + 0,05 %C + + (0,05—0,2) %Mg]	–270 ÷ 1300	1300
Мель-медьникелевые (мель-константан) ТМК	МК (Т)	Т	Медь М1 (Cu)	Сплав константан (55 % Cu + 45 %Ni, Mn, Fe)	–200 ÷ 700	900
Железо-константановые, ТЖК	ЖК (I)	J	Железо (Fe)	—	–200 ÷ 700	900

Стали и сплавы

Для производства оболочек отечественного термопарного кабеля используются сталь типа 12Х18Н10Т и сплав ХН78Т (табл. 2.8).

Для измерения высоких температур в комплекте с термоэлектродами из платиновых и вольфрамрениевых сплавов могут применяться защитные чехлы из тугоплавких металлов и сплавов: тантал (до 1900 °С), вольфрам (до 2700 °С), молибден (до 2200 °С), ниобий (до 2000 °С) и сплавы из этих и других металлов. Лучшим решением является применение в качестве материала оболочек и чехлов, близких по составу к термоэлектродам. Это снимает или облегчает проблемы, которые могут возникнуть вследствие разности термического расширения чехлов и термоэлектродов, а также уменьшит перенос элементов с чехла на термоэлектроды или наоборот.

Преимущественным материалом для СИ температуры в атомной энергетике является сталь типа 12Х18Н10Т.

Керамика (неметаллические материалы)

Распространенным конструкционным неметаллическим материалом в термометрии является кварц, имеющий высокую термическую стойкость. Он способен выдержать более 15 теплосмен от 1000 °С (печь, 15 мин) до 20 °С (вода, 5 мин), а также 10 и более погружений в жидкий чугун при температуре до 1550 °С. Однако применение кварца в комплекте с платиносодержащими материалами не рекомендуется из-за охрупчивания и разрушения термоэлектродов или

Таблица 2.8

Стали и сплавы, применяемые в термометрии

Марка стали, сплава	Рекомендуемая температура (температура интенсивного окалинообразования), °С	Рекомендуемая среда
0Х13	650 (750)	Слабоагрессивные среды
12Х18Н10Т	800 (850)	В условиях ядерного облучения, щелочные жидкие металлы
10Х17Н13М2Т	800 (850)	Кипящие фосфорная, серная, 10 %-ная уксусная кислоты, серноокислая среда
ХН45Ю	1250—1300	Продукты сгорания природного газа
08Х18Н10Т	800 (850)	В условиях ядерного облучения
Х23Ю5	1200 (1300)	Углеродсодержащие среды
ХН78Т	100 (1050)	Коррозионная среда

изменения их градуировочной характеристики. Это происходит вследствие образования химических соединений — силицидов платины.

В металлургической термометрии основным материалом является корунд (оксид алюминия Al_2O_3). Из него получают достаточно плотные и стойкие в расплавах сталей чехлы. Корунд до 1700°C не взаимодействует с воздухом, водяным паром, водородом, оксидом и диоксидом углерода. Перспективным материалом является монокристаллический оксид алюминия — лейкосапфир (Al_2O_3) в виде пробирок. Он вакуумно плотен, не взаимодействует со многими агрессивными газами, например, продуктами горения природного газа, серосодержащими средами и т.п. Его недостаток — высокая стоимость, ограниченная термостойкость (хорошо выдерживая нагрев, он при быстром охлаждении покрывается сетью трещин).

В Германии, Чехии и других странах на основе оксида алюминия изготавливают материалы согласно стандарту МЭК 60672. Отличительной особенностью керамики С799, соответствующей этому стандарту, является минимальное содержание в ней примесей (содержание оксида алюминия не менее 99 %), возможность использования при температуре 1800°C и высокая прочность. Основным преимуществом чехлов из керамики С795 является соотношение цена — качество. По своим техническим характеристикам керамика С795 очень близка к С799, а ее стоимость значительно меньше. Чехлы из С795 — наиболее оптимальный вариант практически для всех условий эксплуатации платинородий-платиновых термопреобразователей типа ТППТ (S). Чехлы из керамики С799 можно рекомендовать для термопреобразователей ТППТ (В), эксплуатирующихся при температурах выше 1500°C и при высокой концентрации агрессивных примесей в термометрируемой среде.

При применении защитных чехлов из неметаллических материалов необходимо обеспечить герметичность соединения чехла и головки термопреобразователя, которая изготавливается из металла или пластмассы. Чехлы из неметаллических материалов имеют значительную тепловую инерцию. Они не могут использоваться для измерения высоких температур в затесненных условиях, например, в центре топлива твэл. Выходом может стать защитное покрытие из дисилицида молибдена MoSi_2 , наносимое на капилляр из молибденового сплава [15]. Такой чехол функционировал в парогазовой среде при температуре $1700\text{—}1750^\circ\text{C}$ в течение 8—10 ч и разрушался при $1900\text{—}1940^\circ\text{C}$ за 15 мин. Несмотря на малое время работы такого

покрытия, можно успеть получить важную информацию о температуре, например, в центре топлива твэл в пусковых режимах. Известно об использовании молибденовых чехлов, покрытых вольфрамом и дисилицидом вольфрама WSi_2 . Такой чехол использовался для измерения температуры до 2400 °С в ядерном реакторе [1].

Электроизоляционные материалы

Выбор электроизоляции для преобразователей всех типов определяется температурой и условиями использования преобразователя. Изоляция должна иметь температуру плавления, не ниже, чем температура плавления термоэлектродов, высокую термическую стабильность и совместимость с материалами термоэлектродов и термосопротивления, хорошую устойчивость к воздействию внешней среды, в том числе, к облучению, технологичность и достаточно высокое электросопротивление при рабочих температурах.

Уменьшение сопротивления изоляции приводит к шунтированию термоэлектрической цепи и к уменьшению регистрируемого сигнала. В простейшем случае это уменьшение равно

$$\Delta U = U_{\text{ТЭП}} \frac{1}{1 + R_{\text{из}}/R_{\text{ТЭП}}} \cong U_{\text{ТЭП}} \frac{R_{\text{ТЭП}}}{R_{\text{из}}},$$

где $U_{\text{ТЭП}}$ — значение термоЭДС; $R_{\text{из}}$ и $R_{\text{ТЭП}}$ — сопротивления изоляции между электродами и термоэлектродами.

В качестве межэлектродной изоляции применяются оксиды металлов, реже — другие соединения металлов — нитриды, карбиды. Некоторые характеристики изоляционных материалов приведены в табл. 2.9 [15]. Температурная зависимость удельного электросопротивления некоторых оксидов, применяемых в качестве изолятора, представлена на рис. 2.23. Электрические свойства оксидов сильно зависят от чистоты исходных материалов и технологии изготовления.

Распространенной формой изоляции в термоэлектрических преобразователях являются бусы и соломка из керамических материалов. Соломка бывает одноканальной и многоканальной. Она предпочтительней, чем бусы, так как менее вероятно перекручивание термоэлектродов и их замыкание между собой и на корпус арматуры.

В микротермопарах применяют изоляцию, наносимую на термоэлектроды в виде поверхностных покрытий. Примером такой изоляции, имеющей высокие эксплуатационные показатели, является органосиликатное соединение.

Таблица 2.9

Характеристики изоляционных материалов

Материал	Химическая формула	Температура плавления, °С	Удельное электросопротивление, Ом · м	Термостойкость
Кварц полиморфный	SiO ₂	1480	50—100 при 1300 °С	Отличная
Кварцевое стекло	SiO ₂	1710	—	—
Тридимит	SiO ₂	1670	—	—
Кристобалит	SiO ₂	1700	—	—
Кремнезем кристаллический	SiO ₂	1730	—	—
Муллит	3Al ₂ O ₃ · 2OSiO ₂	1830	—	—
Глинозем, корунд	Al ₂ O ₃	2020—2050	10 ⁴ при 1100 °С; 10 ³ при 1400 °С	Очень хорошая
Шпинель	MgO · Al ₂ O ₃	2110	—	—
Циркон	ZrO ₂ · SiO ₂	2400—2570	—	—
Диоксид титана	TiO ₂	1780—1800	—	—
Оксид бериллия	BeO	2440—2570	3,5 · 10 ⁸ при 1600 °С, 8—80 при 2100 °С	Отличная
Диоксид циркония	ZrO ₂	2600—2900	10 ⁻¹ —10 ⁻² при 2000 °С	Хорошая
Оксид магния	MgO	2500—2640	5 при 2000 °С	Слабая
Магнезия, периклаз	MgO	2800—2900	—	Слабая
Диоксид тория	ThO ₂	2950—3300	15 при 1800 °С	Слабая
Оксид иттрия	Y ₂ O ₃	2410—2440	3—30 при 1500 °С	Слабая
Диоксид гафния	YfO ₂	2780	—	—
Нитрид бора	BN	3000	10 ² при 2000 °С	Хорошая
Карбонитрид бора	BCN	3000	10 ² при 2000 °С	Хорошая

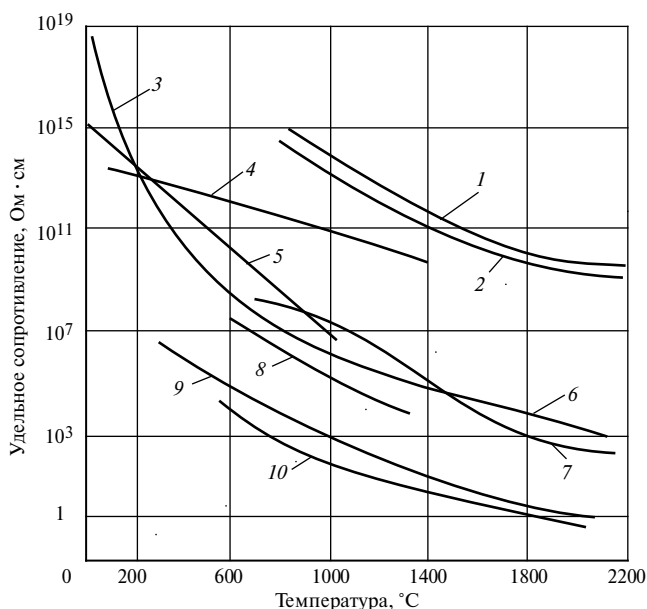


Рис. 2.23. Температурная зависимость удельного электросопротивления оксидов:

1 — BeO; 2 — MgO; 3 — SiO₂; 4 — ThO₂; 5 — Al₂O₃; 6 — BeO; 7 — MgO; 8 — TiO₂; 9 — ZrO₂; 10 — стабилизированный ZrO₂

Органосиликатная изоляция термоэлектродов и термосопротивлений обладает рядом преимуществ по сравнению с такими традиционными видами изоляции, как нитроэмаль, стеклоэмаль, алунд и т.п. [16]. Так, стеклоэмаль плохо противостоит механическим и тепловым ударам. Материалы типа алунд хрупки, пористы, слабо сцеплены с термоэлектродами. Органические полимеры и составы на их основе (со стеклом, асбестом, слюдой и т.п.) имеют низкую температурную стойкость. Кремнийорганические полимеры также имеют ограниченную температурную стойкость — не более 250 °С. Органосиликатные материалы обладают хорошим набором свойств: эластичностью, гидрофобностью, повышенной теплостойкостью при сохранении электроизоляционных свойств, химической и радиационной устойчивостью.

Органосиликатные покрытия термоэлектродов сохраняют изоляционные свойства при температурах до 1250 °С. Они допускают минимальный изгиб провода на оправке диаметром 1—2 мм при 10-кратном повторении операции. Увеличение температуры до 900 °С и

снижение за 15—20 с до комнатной температуры по 8—10 раз не приводили к разрушению изоляции из этого материала. При нагреве провода до 1250 °С не было обнаружено окисления провода, защищенного этой изоляцией, в течение нескольких сотен часов.

2.4. Метрологические характеристики средств измерений температуры

Эффективное использование СИ возможно в том случае, если известна степень соответствия измеренного значения физической величины ее истинному значению. С этой целью для каждого СИ вводятся и нормируются его метрологические характеристики (МХ).

Метрологическими называются характеристики СИ, которые оказывают влияние на результат измерения и на погрешность измерения. Устанавливаемые нормативно-техническими документами МХ называются *нормируемыми*, определяемые экспериментально — *действительными*. Метрологические характеристики разделяют на следующие группы.

1. Характеристики, предназначенные для определения показаний СИ. К ним относятся: функции преобразования измерительного преобразователя (термопары, термосопротивления) и измерительного прибора; значения меры (устройство для воспроизведения реперной точки); цена деления шкалы и т.п.

2. Характеристика качества измерений — погрешности, точности и правильности.

3. Характеристики чувствительности СИ к влияющим факторам.

4. Динамические характеристики СИ, учитывающие тепловую инерцию СИ температуры.

5. Характеристики взаимодействия с объектами, температура которых контролируется.

6. Неинформативные параметры выходного сигнала СИ.

Характеристики, предназначенные для определения показаний СИ. Функции преобразования первичных термоэлектрических преобразователей и термопреобразователей сопротивления, представляются в виде таблиц, графиков, а также формул (обычно, полиномов). Вторичные преобразователи (показывающие, записывающие, регулирующие) характеризуются ценой деления, длиной шкалы (диапазоном измерения). Реперная точка имеет значение воспроизводимой ею температуры фазового перехода.

Характеристика качества измерений. В качестве характеристик точности первичных преобразователей в большинстве случаев выби-

раются предельные допускаемые отклонения термоЭДС термопар и электросопротивления термопреобразователя сопротивления в температурном эквиваленте. Для вторичных преобразователей используется понятие класса точности СИ.

Динамические характеристики СИ. Для СИ температуры характерным динамическим свойством является тепловая инерция. Она определяется массивностью и теплопроводностью арматуры, защищающей преобразователя от внешней среды, теплопроводностью электрической изоляции между термоэлектродами и защитной средой, качеством теплового контакта между чувствительным элементом преобразователя и защитным чехлом и т.п. При измерении температуры в динамическом режиме необходимо иметь сведения об инерции преобразователя и также об инерционных свойствах объекта измерения, которые должны быть согласованы между собой. Нецелесообразно, хотя и допустимо, использовать малоинерционное СИ температуры, если температура объекта изменяется медленно. И наоборот, бессмысленно применять инерционное СИ, если температура объекта изменяется быстро.

Динамические свойства влияют на погрешность определения температуры в нестационарном режиме работы контролируемого оборудования. Особое значение имеют динамические характеристики при контактных измерениях температуры. При значительном контактном термическом сопротивлении между чувствительным элементом преобразователя и объектом контроля погрешность измерения нестационарной температуры может быть большой.

Наиболее распространенным методом определения динамической характеристики СИ температуры является метод определения так называемой «постоянной времени» (или показателя тепловой инерции ε_{∞} , или времени термической реакции). Она обычно определяется как время, за которое показания СИ достигают приблизительно 2/3 (67 %) разницы между исходным значением температуры среды и конечным показанием после скачкообразного измерения температуры среды, в которой находится СИ. Эта величина, как правило, указывается в документации на СИ (Технические условия, Инструкция по эксплуатации и т.п.). Обычно в документации на СИ предлагается следующий способ определения «постоянной времени». Преобразователь, находящийся при комнатной температуре, быстро помещается в кипящую воду. Сигнал преобразователя записывается быстродействующим прибором. На рис. 2.24 показано, как определяется «постоянная времени».



Рис. 2.24. Определение «постоянной времени»:

$t_{\text{н}}$ — начальная температура преобразователя; $t_{\text{кон}}$ — температура среды, в которую погружают преобразователь

Отметим, что «постоянная времени» зависит от интенсивности теплообмена между средой и преобразователем. Поэтому она меньше при помещении преобразователя в проточную кипящую воду и тем более в расплавленный металл.

Другой метод определения показателя тепловой инерции основан на применении метода регулярного режима первого рода [1]. По этому методу преобразователь также помещается в среду с температурой, отличной от начальной. Если имеет место тепловой режим первого рода (температура среды и коэффициент теплоотдачи постоянны), в полулогарифмическом масштабе функция $\ln \Delta t = f(\tau)$ есть прямая линия, угловой коэффициент которой — показатель тепловой инерции. Методы определения динамических характеристик преобразователей температуры рассмотрены в монографиях [17, 18].

Характеристики чувствительности СИ к влияющим факторам. Внешними (влияющими) факторами, оказывающими влияние на показания СИ и на точность измерения температуры, являются время, уровень температур, интенсивность внешних магнитных, электрических и радиационных полей, механические нагрузки и т.п. К ним также можно отнести температуру холодных спаев термпар.

Характеристики взаимодействия с объектами. Первичные преобразователи температуры взаимодействуют с объектами, температура которых контролируется, изменяя температурное поле объекта в месте, в котором расположен первичный преобразователь. Изменение возникает вследствие утечки (или притока) тепла вдоль термоэлектродов и арматуры преобразователя. К метрологическим характеристикам преобразователя температуры может быть отнесено указание длины, на которую он должен быть погружен в контроли-

руемую жидкость или в твердое тело, при которой отток (приток) тепла не сказывается на показаниях СИ.

Неинформативные параметры. К неинформативным относятся параметры, которые непосредственно не несут информации об измеряемой величине, однако влияют на точность измерения. К ним можно отнести допустимое значение электросопротивления термоэлектродов термопары. Превышение этого значения может вызвать затруднения с функционированием вторичного преобразователя. Другой пример — значение допустимого тока термопреобразователя сопротивления. Его превышение вызывает перегрев чувствительного элемента и появление дополнительной погрешности измерения.

Метрологические характеристики являются показателями качества и технического уровня всех средств СИ. Для их определения конкретный тип СИ должен пройти метрологическую сертификацию. Она представляет собой исследование, выполняемое метрологическим органом для определения их метрологических характеристик СИ, заявленных производителем. Сертификация завершается выдачей сертификата об утверждении типа — документа с указанием технических и метрологических характеристик СИ.

2.5. Классификация методов измерений

Из курса метрологии известно, что измерения бывают прямыми, косвенными, совместными и совокупными.

Прямыми являются измерения, результат которых получается непосредственно при считывании показаний СИ. *Косвенными* называются измерения, при которых значение измеряемой величины находят по известной зависимости $A = F(X_1, X_2, \dots, X_n)$, где X — результат прямых измерений. Разновидностью косвенных измерений являются совместные и совокупные измерения. Совокупными являются измерения нескольких одноименных величин, производимых одновременно, при которых их значения находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин. Совместные измерения отличаются от совокупных тем, что измеряются разноименные величины.

Примером прямых измерений является непосредственное считывание показаний СИ. Путем косвенного измерения может быть определено по закону Ома сопротивление проводника при разных температурах. С помощью совместных измерений могут быть найдены коэффициенты уравнения зависимости сопротивления чувствительного элемента термопреобразователя сопротивления от температуры.

Кроме того, в зависимости от числа измерений, различают однократные и многократные измерения.

Однократные измерения характерны для технических измерений, *многократные* — для исследовательских, а также для метрологических целей, когда нужно уменьшить случайную погрешность измерения.

Для производственных измерений температуры характерны прямые однократные методы. В экспериментальной практике, кроме того, могут применяться прямые многократные измерения температуры. При необходимости для получения более подробных сведений читатель может обратиться к монографии по метрологии, например [19].

2.6. Методы и средства поверки (калибровки) средств измерений температуры

2.6.1. Поверка и калибровка средств измерений температуры

Законом «Об обеспечении единства измерений» определяются понятия поверки и калибровки СИ. В соответствии с законом поверка — это совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы (другими, уполномоченными на то органами, организациями) в целях определения и подтверждения соответствия СИ установленным техническим требованиям. Калибровка — это совокупность операций, выполняемых в целях определения и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности к применению СИ, не подлежащего государственному метрологическому контролю и надзору. Калибровка осуществляется метрологическими службами юридических лиц.

В соответствии с законом обязательной поверке подлежат СИ, применяемые в торговле, здравоохранении и охране окружающей среды, при обеспечении безопасности труда и обороны страны, при испытаниях и контроле качества продукции для установления соответствия обязательным требованиям стандартов, при производстве продукции для государственных нужд, при обязательной сертификации продукции и услуг, в государственных учетных операциях, в банковских, налоговых, почтовых и других операциях, при проведении мероприятий по решению суда, прокуратуры и т.п.

Таким образом, поверка должна подтвердить соответствие СИ его техническим условиям или другим документам. Если СИ не соответствует техническим условиям, оно считается не прошедшим поверку (рис. 2.25). Поверка применяется в тех случаях, когда по тем

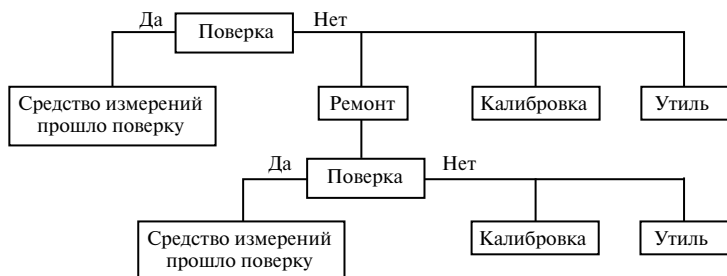


Рис. 2.25. Схема действий при поверке средств измерений

или иным причинам нельзя допустить эксплуатацию с изменившимися метрологическими характеристиками. Очевидно, что этого нельзя допускать, например, в торговых операциях. Калибровка устанавливает и подтверждает новые метрологические характеристики, отличные от исходных характеристик.

Не следует думать, что калибровка является второстепенной по значению процедурой по сравнению с поверкой. На реакторных установках калибровка применяется для преобразователей ряда параметров, главным образом, температуры и энерговыделения.

Частью поверочных и калибровочных процедур является градуировка СИ. Градуировка — определение градуировочной характеристики СИ — зависимости между значениями величин на входе и выходе СИ, получаемой экспериментально. Эта характеристика может быть выражена в виде формулы, графика или таблицы (Рекомендация по межгосударственной стандартизации РМГ 29—99. «Метрология. Основные термины и определения»).

Далее эти вопросы будут рассмотрены применительно к работе в условиях ядерных энергетических установок.

Поверка и калибровка проводятся в одном из двух случаев:

- при приемосдаточных испытаниях выпускаемого промышленностью СИ;

- при завершении межповерочного интервала (см. п. 2.6.4).

С точки зрения метрологического обслуживания все СИ и измерительные каналы измерительных систем делятся на группы:

- подлежащие поверке;
- подлежащие калибровке;
- недоступные для метрологического обслуживания в межповерочный (межкалибровочный) интервал;
- переведенные в разряд индикаторов.

Различают следующие методы поверки (калибровки) и градуировки средств измерений вообще и температуры в частности:

1. Непосредственным сличением поверяемого (калибруемого) с образцовым СИ того же вида.
2. То же, но сличение проводится с помощью специального прибора — компаратора; такая процедура проводится тогда, когда образцовое и поверяемое различаются по типу.
3. Прямым измерением поверяемым СИ величины, которая воспроизводится образцовой мерой.
4. Прямым измерением образцовым СИ величины, воспроизводимой мерой, подвергаемой поверке.
5. Косвенным измерением величины, воспроизводимой мерой или поверяемым средством путем независимой, автономной поверки (калибровки).

Первый метод используется для поверки или калибровки рабочего термоэлектрического преобразователя по показаниям эталонного (образцового) термоэлектрического преобразователя, сличение показаний эталонной и поверяемой (калибруемой) термопары.

Второй метод применяют для поверки термоэлектрического преобразователя по показаниям эталонного термопреобразователя сопротивления (или наоборот). При поверке в этом случае может быть использован компаратор.

Третий метод используется при поверке преобразователя по реперным точкам температуры фазового перехода образцовых веществ. Первичные реперные точки, допущенные МТШ-90, перечислены в табл. 2.2.

Четвертый метод может быть использован для контроля точности воспроизводства температуры фазового перехода реперного вещества (реперной точки), когда применен образец нового реперного вещества, или относительно качества которого есть сомнения.

Пятый метод в обычной термометрической практике, по-видимому, не используется. Он может применяться в экспериментальных работах, при разработке новых СИ, обладающих высокой точностью, которая пока не обеспечивается имеющимися эталонными средствами.

Преимущество метода сличения показаний поверяемого (калибруемого) СИ с показаниями эталонного (образцового) СИ заключается в том, что имеется возможность получения практически любого эталонного значения температуры в достаточно широком температурном диапазоне. Преимущество метода сличения с реперной температурой состоит в большей точности поверки (калибровки).

2.6.2. Применение реперных точек для поверки средств измерений температуры

Для поверки (калибровки) с помощью реперных точек термопреобразователи размещают в термостате — устройстве, с помощью которого воспроизводится реперная точка — точка фазового перехода реперного вещества. Реперное вещество в этом термостате разогревают (или охлаждают) до наступления фазового перехода — расплавления (затвердевания) или кипения (конденсации). При установлении постоянства температуры температура термопреобразователя соответствует известной температуре фазового перехода реперного вещества. Погрешность поверки (калибровки) складывается из погрешности воспроизводства значения реперной точки и погрешности измерения выходного параметра (термоЭДС, электросопротивления и т.п.) поверяемого (калибруемого) преобразователя.

Поверка (калибровка) с помощью реперных точек основана на том, что фазовый переход (плавление, затвердевание, кипение) чистых веществ происходит при постоянной температуре фазового перехода $t_{ф.п.}$, характерной для данного вещества. Этот переход длится некоторый промежуток времени, в течение которого реперное вещество полностью переходит из одного фазового состояния в другое (из жидкости в пар, из твердого вещества в жидкое и т.п.). В течение этого перехода температура при соблюдении определенных условий остается постоянной, а после завершения перехода температура начинает изменяться (рис. 2.26). Температуру, при которой происходит фазовый переход, называют *температурой площадки*.

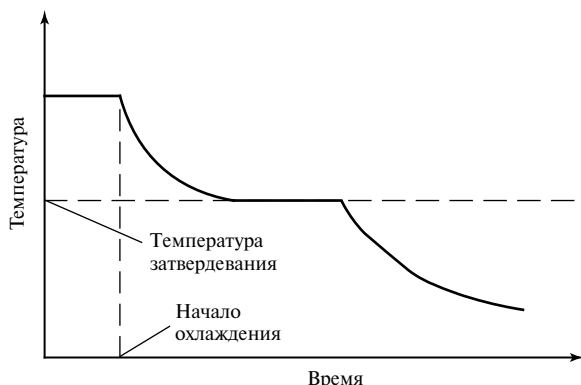


Рис. 2.26. Охлаждение реперного материала

Опыт показал, что процесс затвердевания, как правило, воспроизводится стабильнее, чем процесс плавления. Поэтому в большинстве случаев температуру площадки получают при охлаждении предварительно расплавленного реперного вещества, последующем его затвердевании и дальнейшем охлаждении в твердом состоянии.

Если в качестве реперного используется вещество, совершающее фазовый переход от жидкости к пару, надо учитывать, что температура кипения зависит от давления, и его нужно с необходимой точностью поддерживать или измерять. Температура кипения воды при заданном давлении определяется с помощью Таблиц свойств воды и водяного пара или по формуле

$$t(^{\circ}\text{C}) = \left[100 + 28,0126 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right) - 11,642 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^2 + 7,1 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)^3 \right].$$

Здесь $p_0 = 101325$ Па; p — сумма атмосферного и избыточного давления пара, Па.

На практике в качестве реперных веществ используются не идеально чистые вещества. Каждое вещество в той или иной степени загрязнено примесями, которые в той или иной степени искажают температуру идеальной площадки. В результате при затвердевании температура вещества может несколько отличаться от ожидаемой.

Влияние примесей на изменение температуры затвердевания можно оценить с помощью уравнения Вант-Гоффа:

$$\Delta T = \frac{RT_0^2}{L} \frac{n_1}{n_1 + n_2},$$

где T_0 — температура чистого вещества; R — универсальная газовая постоянная; L — теплота плавления вещества; n_1 , n_2 — количество молей примеси и основного вещества в нем.

Для проверки эталонных СИ температуры содержание основного реперного металла должно быть не менее 99,9999 % масс. Это обеспечивает отклонение температуры затвердевания не более чем на несколько десятых долей милликельвина.

Исследования олова, цинка, сурьмы, серебра, золота, меди, содержащих примеси в количестве не более 0,001 % масс., показали, что разброс их температур затвердевания не превышает нескольких милликельвинов.

Использование менее чистых металлов возможно лишь при условии предварительного изучения температурных площадок и определения температуры затвердевания образцовым термометром.

Важным также является соблюдение медленной скорости охлаждения реперного вещества. Это связано, во-первых, с возможным переохлаждением расплава этого вещества и, во-вторых, с неизотермичностью объема реперного вещества, возникающей при нестационарном режиме его охлаждения.

Многим металлам, которые используются в качестве реперного материала, присуща склонность к переохлаждению вследствие небольшой скорости образования центров кристаллизации. Поэтому такой металл может сохранять жидкое состояние при температурах, которые отличаются от равновесной температуры затвердевания. Глубина переохлаждения зависит как от свойств самого реперного материала, так и от условий его охлаждения, в частности, от присутствия шероховатостей на стенке сосуда с реперным материалом, наличия затравок (нерастворенных примесей) в объеме материала, вибрации сосуда с расплавом и т.п. Эти факторы не всегда воспроизводятся в полном объеме от эксперимента к эксперименту.

К металлам, склонным к сильному переохлаждению, относятся галлий и олово — возможное переохлаждение до 20 К, сурьма — до 40 К. Небольшое переохлаждение — до 1 К — могут испытывать свинец, кадмий, цинк, индий, серебро, золото. Борьба с этим явлением обычно состоит в стимулировании образования центров кристаллизации путем кратковременного охлаждения или самого испытуемого термопреобразователя, извлекаемого из тигля с реперным материалом, или всего тигля вместе с термопреобразователем и расплавленным реперным материалом.

Воспроизводимость температуры затвердевания образца достаточно чистых металлов при тщательном выполнении эксперимента может быть оценена среднеквадратичным отклонением 0,3—0,5 мК для олова и цинка и 1 мК для меди. Для менее чистых металлов это отклонение может быть в 2—3 раза больше.

Влияние внешнего давления на температуру затвердевания невелико: $\frac{dT}{dp} = (3 \div 6) \cdot 10^{-6}$ мК/Па. При поверочных процедурах для эталонов и при международных сличениях результаты измерений приводят к значению давления 10 1325 Па с учетом давления газа и гидростатического столба расплава. Заметим, что реализация тройной точки для металлов затруднительна, так как она соответствует весьма низкому давлению пара металла. Это требует обеспечения

низкого давления остаточных газов над расплавом (не более 0,6—6 Па), при котором температура затвердевания неощутимо отличается от истинной тройной точки. Воспроизводимость тройных точек ртути, индия, рублидия составляет 0,1 мК.

Особое место в МТШ занимает тройная точка воды — точка, в которой в равновесии находятся вода, лед и пар. Этой точке приписывают температуру 273,16 К или 0,01 °С. Для ее реализации используют воду, имеющую чистоту и изотопный состав, определяемые требованиями МТШ. Поверка происходит при подтаивании заранее замороженного льда. Воспроизводимость тройной точки воды, достигнутая в настоящее время, составляет 0,02 мК. Ее отклонение для разных ампул с реперной водой не должно превышать 0,2 мК.

Для реализации метода реперных точек используются специальные установки и ампулы с веществами, конструкции которых разнообразны и выпускаются промышленностью. Однако с поддержанием необходимого изотопного состава воды встречаются затруднения. Они связаны с тем, что изотопный состав природной воды заметно зависит от географического положения ее источника. Поэтому в последние годы возникают предложения об определении единицы температуры другим способом — с помощью постоянной Больцмана k , которая является константой пропорциональности между температурой T и энергией E :

$$E = 3/2kT.$$

В настоящее время точность определения постоянной Больцмана относительно невелика. Поэтому введение этого способа определения кельвина сейчас привело бы к увеличению погрешности измерения температуры.

Заметим, что в своих монографиях академик Л.Д. Ландау оперирует с температурой, выраженной через соотношение $E = 3/2kT$.

2.6.3. Поверка методом сличения с показаниями образцового преобразователя

Устройство для поверки и калибровки преобразователей температуры называется *термостатирующим устройством* или *термостатом*. Такими устройствами являются криостаты для температур 13,81—273,16 К, жидкостные термостаты для температур 0—600 °С, сухоблочные термостаты и специальные печи для температур 400—2000 °С. Качество процедур поверки (калибровки), осуществляемых с помощью таких устройств, определяется стабильностью во времени и пространственной однородностью температурного поля. Эти качества в свою очередь определяются теплофизическими свой-

ствами (теплопроводностью, температуропроводностью, вязкостью жидкости) термостатирующих жидкостей и блоков, влияющими на выравнивание температурного поля.

Однородность температурного поля в жидкостных термостатах и криостатах достигается путем вынужденной циркуляции термостатирующей жидкости. Схема жидкостного термостата приведена на рис. 2.27.

Значения некоторых свойств жидких термостатирующих веществ приведены в табл. 2.10. Эти значения зависят не только от выбора термостатирующих веществ, но и от конструкции термостатирующего устройства и температурного уровня. Более высокое качество термостатирования достигается при принудительной циркуляции термостатирующего вещества в термостате.

Для высоких температур применяют сухоблочные термостаты и специальные печи. Для выравнивания температурного поля в них используют металлические блоки с глухими отверстиями для разме-

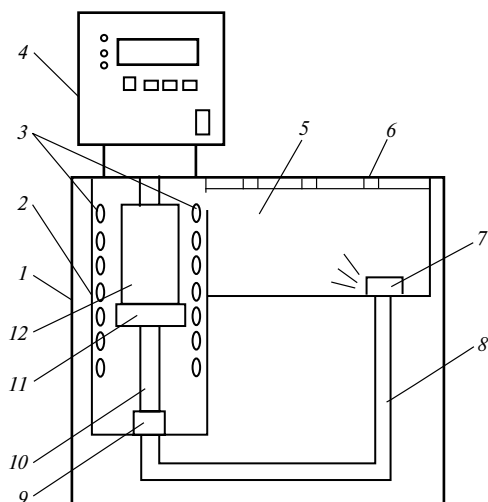


Рис. 2.27. Схема жидкостного термостата:

1 — корпус термостата; 2 — рабочая ванна; 3 — спиральный теплообменник; 4 — блок регулирования и индикации; 5 — основная ванна; 6 — крышка с отверстиями для установки термосопротивлений в основную ванну; 7 — муфта с выходным отверстием, через которое термостатирующая жидкость поступает в ванну; 8 — трубка, соединяющая насос с основной ванной; 9 — соединительная муфта; 10 — выходной патрубок насоса; 11 — центробежный насос; 12 — резервуар для размещения нагревателя и датчика температуры

Таблица 2.10

Термостатирующие вещества

Вещество	Температурный интервал, °С	Стабильность температуры, К	Однородность температурного поля, К/м
Изопентан	-150÷0	—	—
Спирт	-80÷0	—	—
Вода	0÷100	$(1\div 5) \cdot 10^{-3}$	0,01
Масла	-20÷300	$5 \cdot 10^{-3}\div 0,1$	Более 0,1
Поток воздуха	25÷600	—	1,6 (при 400 °С), 4 (при 900 °С)
Смесь нитратов натрия и калия	200÷600	—	—
Олово	250÷1100	—	—

щения исследуемых и эталонных (образцовых) преобразователей. Выбор материала блоков зависит от температурного уровня и атмосферы в печи. Предпочтительны металлы с высокой теплопроводностью. Для температур до 1100 °С используются никелевые блоки. Для температур выше 2000 °С в среде чистого инертного газа или в высоком вакууме (остаточное давление газов менее 10^{-2} Па) используют блоки из тугоплавких металлов (молибден, ниобий и др.).

В последнее время применяют термостатирующие устройства на основе тепловых труб [20]. Тепловая труба — это устройство, в котором выравнивание температурного поля осуществляется за счет организованной естественным образом циркуляции жидкости внутри ограниченного пространства трубы (рис. 2.28). В качестве рабочего тела в них используют различные вещества, в том числе и щелочные металлы. Перечень этих веществ и диапазон температур, в котором применяются эти вещества, приведены в табл. 2.11. Внутренняя полость трубы выстлана фитильным устройством — капиллярно-пористой структурой, как правило, из мелкоячеистой металлической сетки. Различают три зоны тепловой трубы:

- нагрева, в которой рабочая жидкость тепловой трубы испаряется;
- конденсации, в ней пары жидкости конденсируются. Конденсат вследствие смачивания капиллярно-пористой структурой и возникновения капиллярного напора перемещается в зону нагрева и там снова испаряется;
- адиабатическую, разделяющую зоны нагрева и конденсации.

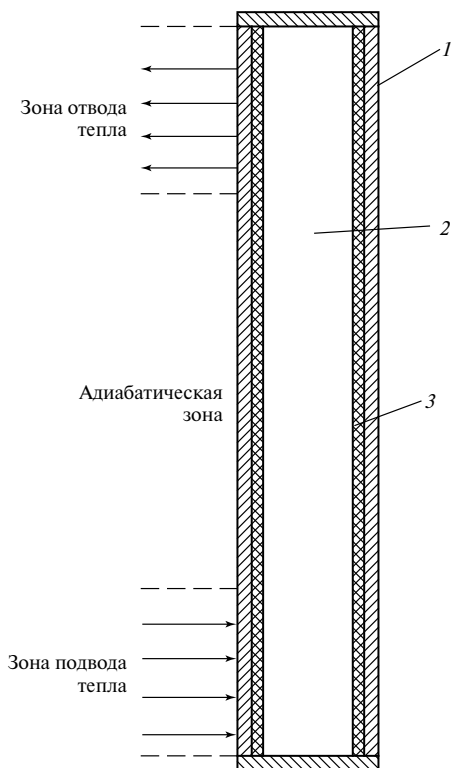


Рис. 2.28. Схема тепловой трубы:

1 — корпус; 2 — пары жидкости; 3 — капиллярная система

В связи с тем, что в трубе протекают высокоэффективные процессы теплообмена — кипение и конденсация, температурное поле внутри трубы равномерно с погрешностью до сотых долей градуса. Применительно к термостатирующим устройствам целесообразно иметь концентрическую тепловую трубу [20], внутри которой находятся поверяемые и эталонные СИ температуры.

Последнее достижение в области создания термостатов — так называемые флюидные (флюидизированные) ванны, выпускаемые фирмами Techne (Великобритания) и Isotech (Германия). Они представляют собой сосуд, заполненный мелкодисперсным порошком оксида алюминия Al_2O_3 (рис. 2.29). Внутри сосуда находятся нагреватель, а также трубки, через которые нагнетается воздух из специального компрессора. Воздух интенсивно перемешивает порошок,

Таблица 2.11

Рабочее тело тепловой трубки

Рабочее тело	Диапазон температуры, К	Рабочее тело	Диапазон температуры, К
Метан	90—150	Даутерм	420—600
Пропилен	170—300	Ртуть	500—700
Фреон-22	180—310	Цезий	650—1100
Аммиак	200—330	Рубидий	700—1100
Ацетон	260—390	Калий	800—1200
Метанол	280—400	Натрий	900—1300
Этанол	290—430	Литий	1300—1800
Вода	310—510	Кальций	1400—2000
Нафталин	400—570	Барий	1600—2500
		Свинец	1620—2170

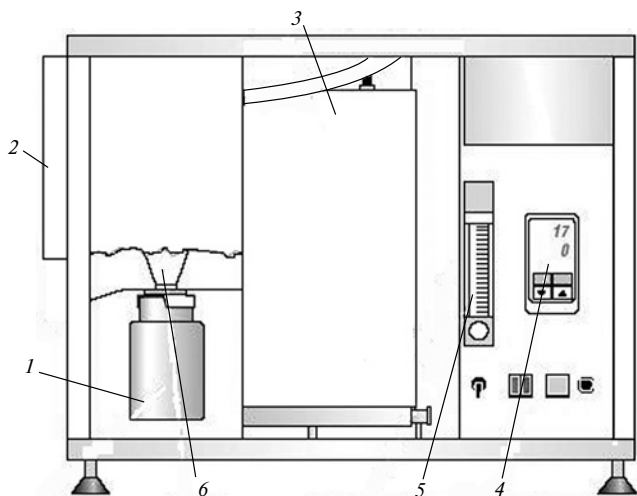
создавая изотермическое пространство достаточно больших размеров при температурах до 1100 °С. Качество термостатирования характеризуется пространственным параметром «неоднородность температурного поля», измеряемым в градусах Цельсия на сантиметр (до 0,01 °С/см) и скоростью изменения температуры «нестабильность поддержания температуры», измеряемой в градусах Цельсия на минуту (до 0,02 °С/мин).

Таким образом, имея хорошую поверочную базу (соответствующие эталонные средства, термостатирующие и измерительные устройства и т.п.) можно проградуировать практически любой преобразователь с малой погрешностью — до сотых долей градуса. Однако, как убеждает опыт, полученная таким образом градуировка имеет значение только в момент ее завершения. Сразу же после завершения этой процедуры при эксплуатации градуировочные характеристики подвергаются изменению (дрейфуют) вследствие развития процессов «старения» преобразователя.

При хранении преобразователя в нормальных условиях дрейф характеристик может считаться несущественным, хотя нет научно обоснованных данных о том, в течение какого времени и при каких условиях хранения можно принять это предположение. Имеются сведения о том, что некоторые образцы термопар, хранящихся при комнатной температуре в течение 25—30 лет и более, с малой погрешностью не изменили свою градуировку. В работе [21] показано, что градуировка термопреобразователя сопротивления практически не



а)



б)

Рис. 2.29. Общий вид (а) и схема флюидного термостата (б):

1 — коллектор пыли; 2 — фильтр выходящего воздуха; 3 — изолированный внутренний коллектор; 4 — панель управления; 5 — регулятор потока воздуха; 6 — циклон

изменилась за 25 лет пребывания в установленном состоянии при температуре около 20 °С. Разумеется, при хранении должно быть исключено воздействие внешней атмосферы на чувствительный элемент преобразователя.

Как сказано выше, полученную с помощью термостатов и других устройств градуировочную характеристику термопреобразователя следует считать не более чем исходной. В дальнейшем при монтаже преобразователя и, особенно, в процессе его эксплуатации дрейф характеристик может превышать погрешность исходной градуировки. Поэтому в следующих разделах учебного пособия рассмотрены вопросы погрешностей измерения температуры, в том числе, в реакторных условиях работы преобразователя, когда на его метрологические характеристики воздействуют время, уровень температуры, механические и радиационные нагрузки, внешняя атмосфера и другие факторы.

2.6.4. Межповерочные интервалы

Поскольку метрологические характеристики СИ температуры изменяются со временем (дрейфуют) по тем или иным причинам, они должны подвергаться регулярной поверке или калибровке. Период времени между очередными поверками (калибровками) называется *межповерочным (межкалибровочным) интервалом*. Применяются два способа назначения этих интервалов [22]:

- установление единого интервала для типа или вида СИ в целом;
- назначение индивидуальных, периодически корректируемых межповерочных интервалов для конкретных СИ.

В свою очередь единый для типа (вида) СИ межповерочный интервал может быть установлен одним из трех способов.

1. Основанием для назначения единого межповерочного интервала могут служить документы Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии (ранее Госстандарта РФ) или ведомственные документы. Обычно такой способ применяют для образцовых (эталонных) СИ или предназначенных для высокоточных, а также для ответственных измерений.

2. Используются данные анализа результатов эксплуатации СИ — предшественников, в развитие которых и создается новый тип СИ.

3. Обоснование межповерочного интервала производится по известным показателям, полученным на основании опыта эксплуатации или по результатам специального исследования метрологической надежности или стабильности средств измерений. Этот способ

может быть в свою очередь реализован многими методами [23], все они основаны на статистическом анализе данных по эксплуатации.

На практике часто межповерочный интервал устанавливается по традиции или даже интуитивно. В документе РМГ-74—2004 «Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений» указано, что первичный межповерочный интервал устанавливается при проведении испытаний СИ для целей утверждения типа СИ организацией государственной метрологической службы, в процессе эксплуатации этот интервал может быть скорректирован той же организацией. В этом документе описаны экспериментальные способы определения и установления межповерочных интервалов. Однако эти способы достаточно общи и не могут быть абсолютно корректно применены ко всем СИ температуры.

Контрольные вопросы

1. Что такое температура?
2. Приведите фундаментальные соотношения для измерения температуры.
3. Поясните устройства температурных шкал.
4. На чем основана международная температурная шкала (МТШ) 1990 г.?
5. Что такое поверочная схема и схема поверки?
6. Как организована поверочная схема для температур выше 273 К?
7. Опишите принцип действия термоэлектрического преобразователя температуры, законы термоэлектрических цепей.
8. Чем отличается термопара от термоэлектрического преобразователя температуры?
9. Поясните схемы устройств термоэлектрического преобразователя температуры, микротермопар, кабельных преобразователей температуры.
10. Охарактеризуйте термопары с жидкометаллическим электродом.
11. Перечислите методы компенсации температуры холодных спаев.
12. Опишите принцип действия и устройство термопреобразователя сопротивления.
13. Перечислите типы вторичных преобразователей температуры.
14. Назовите основные материалы термоэлектродов и термоэлементов термометров сопротивления.
15. Перечислите основные метрологические характеристики средств измерений температуры.
16. Дайте понятия о поверке и калибровке средств измерений температуры.
17. Опишите методы поверки (калибровки).
18. Дайте понятие о межповерочных интервалах.

Глава третья

ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

3.1. Общие положения

Температура, как любая физическая величина, имеет истинное значение $t_{\text{и}}$, которое не известно и в соответствии с постулатом метрологии не может быть получено в результате измерений. Приближенным к истинному является «действительное» значение температуры $t_{\text{д}}$, которое определяется в результате измерительного эксперимента, иногда достаточно сложного. Действительное значение физической величины должно быть настолько близко к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

Разность измеренного t и действительного значений температуры называется *погрешностью измерений* Δt

$$\Delta t = t - t_{\text{д}}.$$

Другой подход к количественному описанию характеристик точности измерений приведен в § 3.4.

Качество измерения может характеризоваться не только погрешностью или неопределенностью измерения, но и другими критериями, не имеющими количественных показателей:

- **точность (достоверность)** измерений — качество измерений, отражающее близость их результатов к истинному значению измеряемой величины, характеризует степень доверия к результату измерения;

- **сходимость** отражает близость результатов измерений одной и той же величины, выполненных в одинаковых условиях. Она отражает влияние случайных погрешностей на результат измерения. К одинаковым условиям относят: одну и ту же измерительную процедуру, одного и того же наблюдателя, одного и того же измерительного прибора, применяемого в одних и тех же условиях, одно и то же место. Сходимость может выражаться через дисперсию результатов;

- **воспроизводимость** отражает близость результатов измерений одной и той же величины, выполненных в различных условиях (в разное время, в различных местах, разными методами и средствами, при разных условиях применения), воспроизводимость может выражаться через дисперсию результатов;

- **правильность** отражает близость к нулю систематических погрешностей результата измерений.

Отметим, что в некоторых монографиях точность измерений определяется количественно как величина, обратная погрешности. Хотя, следует признать, что авторам данного пособия ни разу не приходилось практически встречаться с таким выражением точности. Как правило, точность это качественная характеристика результата измерения. Поэтому выражение «**точность** результата измерения равна $\pm X$ » некорректно. Правильной является запись — «**погрешность** результата измерения равна $\pm X$ ».

3.2. Классификация погрешностей измерений

Погрешности измерений любой физической величины, в том числе температуры, разделяют на случайные и систематические (рис. 3.1).

Случайная погрешность результата измерений изменяет значение и знак случайным образом при повторных сериях измерений одной и той же физической величины одного и того же размера. Эта погрешность является следствием одного из постулатов метрологии, в соответствии с которым любой отсчет есть случайная величина. Она неустранима и неизбежна, ее нельзя полностью исключить путем введения поправки. Однако ее можно уменьшить путем увеличения числа измерений. Так как может быть выполнено ограниченное число измерений, можно определить только оценку случайной погрешности.

Систематическая погрешность результата измерений есть разность между средним значением, полученным при бесконечном числе измерений одной и той же величины в условиях сходимости, и истинным значением измеряемой величины. Как и истинное значение, систематическая погрешность не может быть точно известна. Систематическая погрешность результата измерений остается постоянной или закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины.

Аналогичные определения даются для погрешностей средств измерений.

Из схемы на рис. 3.1 можно видеть, что ее наиболее разветвленная часть относится к систематическим погрешностям. Однако случайная ветвь этого дерева также может быть более подробно расписана. Кроме того, некоторые составляющие обеих ветвей имеют общее происхождение: промахи и субъективные погрешности обя-

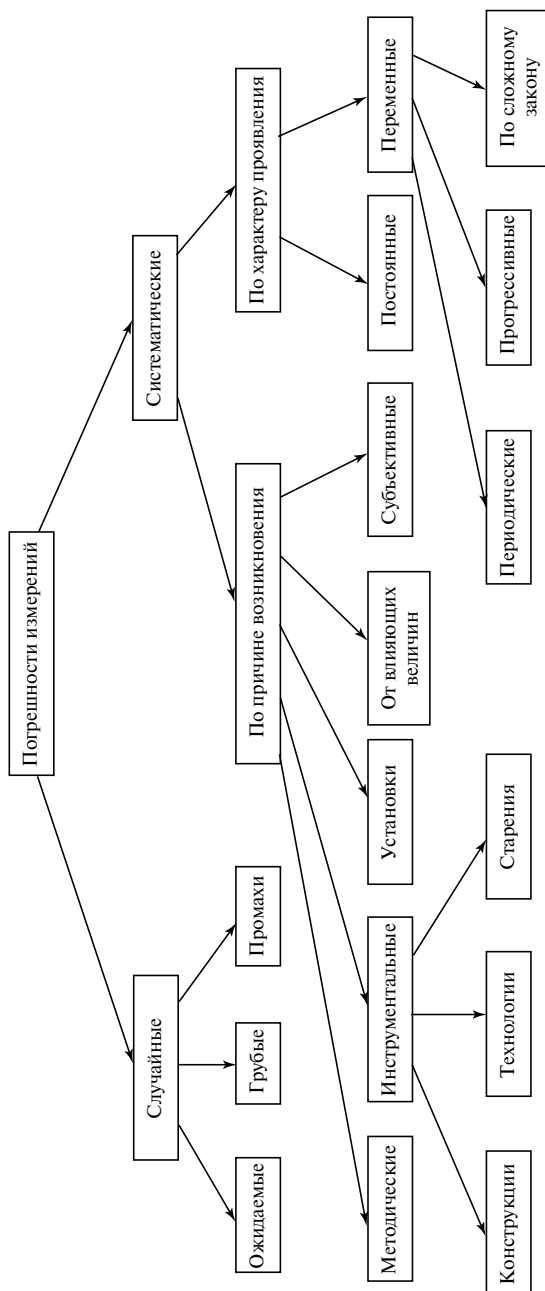


Рис. 3.1. Классификация погрешностей

заны своим происхождением человеку — наблюдателю, производящему измерительный эксперимент.

Иногда трудно уверенно отнести погрешность к той или иной ветви классификации. Например, если с помощью малоинерционной термопары измеряется температура в точке потока жидкости, протекающей в канале и обменивающейся теплом со стенкой, результат измерения будет случайным вследствие влияния на него турбулентных пульсаций температуры. С другой стороны эти пульсации хорошо изучены и, как было определено выше, они «закономерно изменяются при повторных измерениях». Последнее обстоятельство является признаком систематической погрешности. В этом состоит определенная условность отнесения погрешности к той или иной ветви классификации. Тем не менее, предложенная классификация полезна, как и любая классификация.

Приведенная классификация имеет общий характер, она применима ко всем видам измерений, в том числе и к температурным. Погрешности измерения температуры имеют свои особенности. В этой классификации отдельные компоненты могут составлять основную часть общей погрешности измерения температуры.

Рассмотрим эту классификацию и ее составляющие применительно к измерению температуры.

Систематические погрешности делятся на погрешности постоянные (аддитивные), прогрессивные (мультипликативные) и изменяющиеся по сложному закону. Аддитивная погрешность при измерении температуры может возникнуть, если холодные спаи термоэлектрического преобразователя находятся при температуре постоянной, но не равной нулю, и если это неравенство не учитывается. Мультипликативная или по сложному закону погрешность измерения температуры термопреобразователем сопротивления возникает, если реальная градуировка термопреобразователя сопротивления или термоэлектрического преобразователя отличается от стандартной.

Методические и инструментальные погрешности, а также от влияющих величин будут подробно рассмотрены далее. Под погрешностью от установки обычно понимают погрешность, возникающую при неправильной ориентации измерительного прибора по отношению к вектору силы тяжести. К преобразователям температуры эта погрешность непосредственного отношения не имеет. Субъективная погрешность зависит от состояния экспериментатора и возникает, например, при ошибочном считывании результатов измерений.

По способу выражения погрешности разделяют на абсолютные, относительные и приведенные. Относительная погрешность опреде-

ляется как отношение абсолютной погрешности к измеренной величине. Приведенная погрешность есть отношение абсолютной величины к некоторому постоянному значению измеряемой величины.

В п. 2.1.2 указывалось на нецелесообразность выражения погрешности измерения температуры в относительной форме во всех измерительных шкалах, кроме шкалы отношения.

Рассмотрим подробнее инструментальную и методическую погрешности измерений.

3.2.1. Инструментальная погрешность

Инструментальная погрешность по существу есть погрешность инструмента для производства измерений, т.е. средства измерений. Как следует из схемы на рис. 3.1, источниками этой погрешности являются конструкция СИ, технология, принятая при изготовлении СИ, процессы «старения», протекающие при эксплуатации СИ.

Например, неудачно выбранные при конструировании СИ термоэлектродные материалы, неучтенные потери сигнала, развиваемого термопарой и т.п. приводят к появлению инструментальной погрешности. Выбранная при изготовлении СИ технология также может способствовать появлению погрешности вследствие недостаточно точного изготовления чувствительного элемента, например, термопреобразователя сопротивления. Наконец, процессы «старения» СИ часто вносят решающий вклад в появление и развитие инструментальной погрешности. Под старением понимается изменение состава, структуры термоэлектродов и термосопротивлений под воздействием внешней среды и условий эксплуатации. Эта часть инструментальной погрешности подробно рассмотрена далее.

Источником инструментальной погрешности является также неточность настройки каждого элемента тракта, погрешность градуировки (переходная функция), отклонения от номинальных значений компонентов измерительных схем и т.д.

Как правило, инструментальной называют погрешность, как отдельных элементов измерительного тракта, так и всего тракта в целом. Под измерительным трактом понимают первичный преобразователь температуры, линии связи, усилитель, вторичный преобразователь, прибор для измерения сигнала и т.п.

Инструментальная погрешность может состоять из двух основных составляющих: *систематической* и *случайной*. Если для части систематических погрешностей находят их оценки, они устраняются их введением в виде поправок [19]. Погрешности определения поправок рассматриваются как случайные величины. Они суммируются

методами, изложенными в [19]. В простейшем случае погрешность поправок определяется алгебраическим суммированием составляющих погрешностей отдельных поправок:

$$\Delta = \sum_{i=1}^n \Delta_i.$$

где i — номер измерений; n — число измерений.

Случайная инструментальная погрешность может возникнуть, например из-за некачественных, нестабильных электрических контактов.

Инструментальная погрешность СИ температуры может быть определена экспериментально, например путем установки поверяемого и эталонного СИ температуры в стационарное и однородное температурное поле термостата. Разность показаний поверяемого и эталонного средств измерений (измерительных трактов) дает значение инструментальной погрешности тракта, его систематическую погрешность. Статистическая обработка разброса получаемых в таком эксперименте отсчетов позволят получить оценку случайной составляющей систематической погрешности, его среднее квадратическое или стандартное отклонение.

Инструментальная погрешность СИ, относящаяся к нормальным условиям работы, которые оговариваются нормативными документами на СИ, называется *основной погрешностью*. Погрешность, обусловленная влияющими величинами, называется *дополнительной погрешностью*. Она возникает при использовании СИ при условиях эксплуатации (температура, давление, влажность и т.п.), отличающихся от нормальных условий. Эти условия оговариваются в документации на СИ. Максимальное или предельное значение основной погрешности, которое допустимо для СИ данного типа, называется *допускаемой основной погрешностью*.

Классом точности СИ называется обобщенная характеристика СИ, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами СИ, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах или технических условиях на отдельные виды СИ.

Существуют различные способы выражения класса точности: в виде абсолютной предельной допустимой погрешности и в виде той же погрешности, отнесенной к нормирующему значению, — приведенная погрешность, или погрешности, отнесенной к результату измерения — относительная погрешность. В качестве нормирую-

щего значения выбираются полный размах шкалы прибора, ее часть и т.д.

Случайная составляющая инструментальной погрешности характеризуется *вариацией* прибора. Вариация прибора — разность между двумя математическими ожиданиями информативного параметра выходного сигнала, получающимися при измерениях величины, имеющей одно и то же значение, с медленным плавным подходом к этому значению со стороны меньших и больших значений. Максимальная вариация не должна превышать класс точности СИ.

Класс точности первичных преобразователей температуры выражают в виде абсолютной предельной допустимой погрешности. Для показывающих и регистрирующих температуру вторичных преобразователей класс точности прибора, как правило, указывают в относительной форме (абсолютная предельная допустимая погрешность, отнесенная к показанию прибора). При этом в погрешность вторичного преобразователя не включается погрешность первичного преобразователя температуры и погрешность, связанная с линиями связи. Значение класса точности наносится на шкалу прибора в виде знака ©, где С — значение относительной погрешности прибора, или просто в виде знака С, где С в этом случае приведенная погрешность прибора.

В стандартах установлены классы допуска (точности) для различных видов преобразователей температуры (табл. 3.1—3.3). Для каждого класса предлагаются формулы, по которым могут быть рассчитаны пределы допускаемого отклонения в градусах Цельсия (или в милливольтгах, или в омах) в зависимости от температуры измерения. В этом состоит различие с определением класса точности, например для электромеханических измерительных приборов, который выражается в относительной или приведенной формах.

Возникают случаи, когда элементы измерительного тракта работают в условиях, отличающихся от нормальных. Тогда могут возникнуть погрешности, *дополнительные* к основным, благодаря действию *влияющих* величин. Влияющими называют величины, которые не являются предметом измерения, но влияют на результат измерения. Примером может служить отклонение температуры холодных спаев термопары от нормального значения (или диапазона значений) вследствие их разогрева или охлаждения. В промышленных условиях изменение температуры холодных спаев термопары компенсируется с помощью специальных устройств. Однако удовлетворительная компенсация происходит в сравнительно небольшом температурном

3.2. Классификация погрешностей измерений

Таблица 3.1

Пределы допускаемых отклонений термоЭДС термопар от номинального значения

Тип	Международное обозначение	Класс допуска	Диапазон измерений, °C	Предел допускаемых погрешностей, °C
ТПП	S, R	2	0÷600	1,5
			600÷1600	0,0025 <i>t</i>
		1	0÷1100	1
			1100÷1600	1 + 0,003(<i>t</i> – 1100)
ТПР	B	3	600÷800	4,0
		2	800÷1800	0,005 <i>t</i>
			600÷1800	0,0025 <i>t</i>
ТХК	L	3	–200÷–100	1,5 + 0,01 <i>t</i>
		2	–100÷100	2,5
			–40÷300	2,5
			300÷800	0,7 + 0,005 <i>t</i>
ТХК	E	3	–200÷–166,7	0,015 <i>t</i>
			–166,7÷40	2,5
			–40÷333,4	2,5
		2	333,4÷900	0,0075 <i>t</i>
			–40÷375	1,5
			375÷800	0,004 <i>t</i>
ТХА, ТНН	K, N	3	–250÷–167	0,015 <i>t</i>
			–167÷40	2,5
			–40÷333	2,5
		2	333÷1300	0,0075 <i>t</i>
			–40÷375	1,5
			375÷1300	0,004 <i>t</i>
ТВР	A	3	1000÷2500	0,007 <i>t</i>
		2	1000÷2500	0,005 <i>t</i>
ТМК	T	3	–250÷–66	0,015 <i>t</i>
			–66÷40	1,0
		2	–40÷135	1,0
			135÷400	0,0075 <i>t</i>
		1	–40÷125	0,5
			125÷350	0,004 <i>t</i>
ТЖК	J	2	–40÷333	2,5
			333÷900	0,0075 <i>t</i>
		1	–40÷375	1,5
			375÷750	0,004 <i>t</i>

Примечание: *t* — в °C

Таблица 3.2

Классы допуска и диапазоны измерений для термопреобразователей сопротивления

Класс допуска	Допуск, °C	Диапазон измерений, °C		
		Платиновый	Медный	Никелевый
AA	$\pm(0,1 + 0,0017 t)$	– 50÷ 250	—	—
A	$\pm(0,15 + 0,002 t)$	– 100÷ 450	—	—
B	$\pm(0,3 + 0,005 t)$	– 196÷ 660	– 50÷ 200	—
C	$\pm(0,6 + 0,001 t)$	—	– 180÷ 200	– 60÷ 180

Таблица 3.3

Допуски по сопротивлению платинового термопреобразователя ($\alpha = 0,00391 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) с номинальным сопротивлением 100 Ом

Класс допуска	Допуск при 0 °C, Ом	Допуск при 100 °C, Ом
AA	$\pm 0,04$	$\pm 0,10$
A	$\pm 0,06$	$\pm 0,13$
B	$\pm 0,12$	$\pm 0,31$
C	$\pm 0,24$	$\pm 0,62$

интервале, выход за который может привести к появлению дополнительной погрешности.

Изменение рабочей температуры вторичного прибора от нормального значения (обычно $20 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$) также приводит к возникновению дополнительной погрешности. Обычно, она не должна превышать половины допускаемой погрешности на каждые $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ превышения нормальной температуры эксплуатации прибора. Величина дополнительной погрешности должна быть указана в документации на вторичный прибор.

3.2.2. Методическая погрешность

Методическую погрешность еще называют погрешностью метода измерения. Она определяется особенностью метода измерения и к метрологическим свойствам самого СИ не имеет прямого отношения. Отсюда этот вид погрешности измерения можно определить как погрешность результата измерения, вызванную несовершенством метода измерения.

В термометрии в большинстве случаев методическая погрешность связана с отличием температуры чувствительного элемента (рабочего спая термопары или термосопротивления) от температуры

объекта измерения. Это различие возникает из-за изменения температурного поля объекта измерения под воздействием установленного СИ. Оно является следствием следующих основных причин:

- теплоотвода по элементам конструкции СИ (например, по проходам и конструкциям термопреобразователей), вследствие чего искажается температурное поле объекта в зоне расположения чувствительного элемента преобразователя. Теплоотвод может возникнуть вследствие конвективного или лучистого теплообмена между элементами конструкций преобразователей и окружающей атмосферой.
- искажения температурного поля объекта вследствие нарушения его геометрической формы; например, при выборке в стенке трубы канавки для размещения термопреобразователя. При наличии градиента температуры в стенке трубы температурное поле искажается из-за того, что теплопроводность материала трубы и заполняющего канавку материала различаются между собой.

В некоторых случаях погрешность, обуславливаемая этими причинами, может принимать совершенно неприемлемые значения. Например, в одном из измерений температуры с помощью термопреобразователя сопротивления, установленного на трубе при температуре около 650 °С, его погрешность достигла 50 °С из-за недостаточного теплового контакта термопреобразователя сопротивления с объектом измерения и интенсивного теплообмена поверхности преобразователя с окружающей средой.

Методические погрешности имеют систематические и случайные составляющие. Они могут возникнуть из-за неудовлетворительного экранирования термопреобразователя от влияния помех (магнитного и электрического полей). Систематические погрешности в ряде случаев могут быть исключены если в расчетах учитывать вызывающие их причины. К ним можно отнести, например погрешности, вызванные теплоотводом от рабочего спая термопар по термоэлектродам и арматуре. Они могут быть исключены или существенно уменьшены путем прокладки участка термопары от рабочего спая по изотермической поверхности, установки специального нагревателя на выступающей части арматуры термопреобразователя, защиты от теплопотерь с помощью теплоизоляции и т.п. Небольшая погрешность из-за искажения температурного поля канавкой для размещения преобразователя может быть учтена расчетным образом.

Погрешности измерений температуры поверхности и внутри тела. Рассмотрим измерение температуры на поверхности и внутри твердого тела и жидкости (газа). Измерения этого рода могут поро-

дать большие методические погрешности. Как сказано ранее, они, в основном, связаны с искажением температурного поля объекта измерения при расположении в нем (или на нем) СИ вследствие оттока или притока тепла по элементам преобразователя. Поэтому таким измерениям должен предшествовать тщательный анализ возможных погрешностей.

Расчеты температурных полей композиций из объекта измерений и преобразователя температуры часто бывают затруднительными и не всегда удобны для решения конкретных инженерных задач. Поэтому для уменьшения такой погрешности целесообразно соблюдать следующие требования [17]:

- размеры преобразователя температуры должны быть минимально возможными;
- теплофизические свойства (теплопроводность, температуропроводность) преобразователя и объекта измерений должны быть по возможности близки;
- преобразователь надо стараться располагать в изотермической зоне объекта измерений;
- термическое сопротивление между объектом и преобразователем должно быть минимальным.

Эти требования направлены на то, чтобы свести к минимуму возможное искажение температурного поля объекта при установке на нем или в нем преобразователя и уменьшить разность температуры между преобразователем и объектом измерения. Теория измерения температуры в этих условиях рассмотрена в монографиях [17, 24]. Далее будут рассмотрены примеры взаиморасположения преобразователя и объекта измерения температуры [17].

На рис. 3.2, *a* показан распространенный способ расположения преобразователей температуры для измерения температуры, когда преобразователь (в данном случае термопара) касается поверхности только рабочим (горячим) спаем. При этом температуры поверхности объекта и остальной части преобразователя в большинстве случаев существенно различаются. Источником методической погрешности в этом случае является отток или приток тепла от поверхности по термоэлектродам, приводящий к неравенству температуры спаев и поверхности. Если спай отделен от поверхности электроизолирующей прокладкой, погрешность может многократно возрасти и достичь при неблагоприятных условиях десятков градусов. Рекомендуется по возможности избегать такого положения преобразователя на поверхности. Погрешность может быть практически сведена к нулю, если на проводах преобразователя поместить нагреватель, с

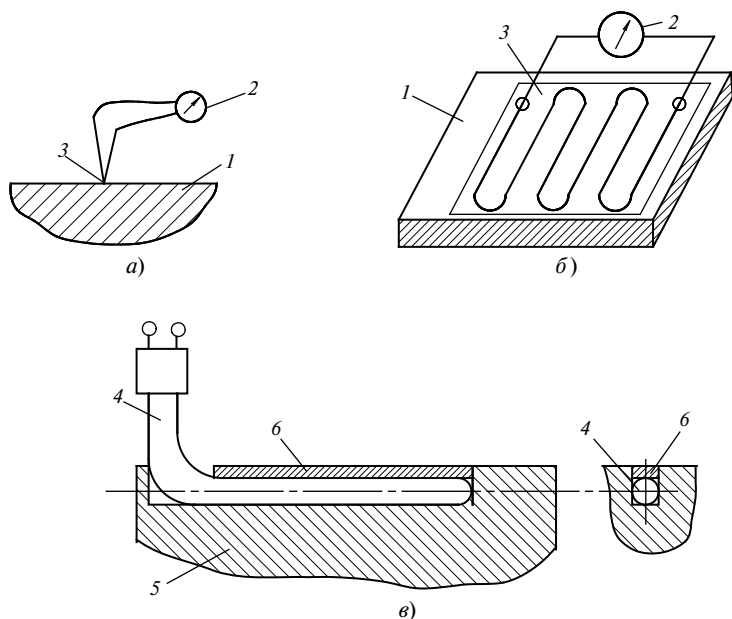


Рис. 3.2. Примеры расположения преобразователей температуры на контрольном объекте:

1, 5 — контрольный объект; 2 — измерительный прибор; 3 — чувствительный элемент; 4 — термоэлектрический кабельный преобразователь; 6 — планка

помощью которого поддерживать равенство температур спая и зоны нагревателя. Отток тепла в этом случае будет отсутствовать.

На рис. 3.2, б показано расположение термопреобразователя сопротивления на поверхности объекта. Минимальная погрешность будет достигнута, если термическое сопротивление между поверхностью и преобразователем будет отсутствовать, а внешняя поверхность преобразователя будет покрыта эффективной тепловой изоляцией. Как сказано ранее, при несоблюдении этих условий при температуре поверхности $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдалась погрешность, превышающая $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

На рис. 3.2, в термопреобразователь зачеканен внутри специальной канавки в теле объекта. Это наиболее благоприятный способ для достижения минимальной погрешности измерения. Однако и в этом случае необходимо, чтобы протяженность размещенного в канавке преобразователя составляла не менее 5—7 его диаметров с тем, чтобы свести к минимуму влияние оттока или притока тепла по тер-

моэлектродам. При точных измерениях температуры следует учитывать, что возникает погрешность, составляющая десятые доли градуса, из-за разницы в теплопроводности основного тела объекта измерения и «начинки» канавки. Аналогичных результатов можно добиться, помещая преобразователь внутри глухого отверстия, имеющего глубину 5—7 его диаметров. Необходимо, чтобы при этом температурное поле в пределах канавки и отверстия было изотермичным.

Погрешность, возникающая при расположении преобразователя внутри трубопровода с жидкостью или газом, также определяется оттоком или притоком тепла вдоль выступающей части чехла в окружающую среду. Значение погрешности зависит от теплопроводности жидкости или газа, от скорости их течения. Она минимальна для жидкого металла и максимальна для газа. Считается, что при протяженности чехла внутри трубопровода более пяти диаметров чехла эта погрешность практически отсутствует.

3.2.3. Динамическая погрешность

Не существует процессов со строго постоянной температурой, каждый процесс является в той или иной степени динамическим, следовательно, измерение температуры в нем может иметь динамическую погрешность. Однако на практике скорость изменения температуры может быть малой, тогда, по-видимому, не имеет смысла относить процесс к нестационарному, динамическому.

Критерий, по которому измерение может быть отнесено к динамическому, предложен в монографии [18]. Согласно ему, если скорость изменения температуры больше погрешности измерения этой скорости, температуру можно считать нестационарной. Понятие о стационарности носит статистический характер и, кроме того, зависит от конкретного значения интервала времени Δt , в течение которого производятся измерения.

В наибольшей степени динамические погрешности измерения проявляются при контактных измерениях температуры, когда большой вклад в динамику измерения вносит контактное термическое сопротивление между объектом измерения и установленным на нем преобразователем температуры, а также тепловая инерция различных звеньев термометрического устройства. В большинстве случаев инерция измерительных цепей, усилителей и преобразователей электрического сигнала малы по сравнению с тепловой инерцией термоэлектрического преобразователя или термопреобразователя сопротивления.

3.2.4. Основные источники инструментальной погрешности измерений температуры

Невоспроизводимость химического состава сплавов, применяемых для изготовления термоэлектродных проводов и проводов для термопреобразователя сопротивления

При выплавке металлов и сплавов для изготовления термоэлектродной проволоки возможны небольшие отклонения в их составе. При массовом производстве термоэлектродных материалов эти отклонения обычно компенсируются тем, что подбираются пары термоэлектродов, дающие в сумме номинальную статическую характеристику, удовлетворяющую требованиям стандартов. Если же термоэлектрические сплавы определенного состава производятся в ограниченном количестве, возможность для подбора пар ограничена, и удовлетворительного сочетания термоэлектродов не всегда удается достичь. В этом случае термопреобразователи не пройдут поверочные испытания, однако их можно калибровать и применять, учитывая их реальную градуировку.

Разумеется, отклонения в составе сплавов не должны существенно изменять другие характеристики термоэлектродного материала (прочность, пластичность, электрическое сопротивление и т.п.).

Термоэлектрическая неоднородность термоэлектродных сплавов

Эта неоднородность называется также *местной неоднородностью сплавов*. Погрешность, связанная с ней, возникает вследствие включения в термоэлектрическую цепь участков, имеющих разные термоэлектрические свойства [25].

Непосредственной причиной возникновения термоэлектрической неоднородности (ТЭН) являются локальные (местные) или протяженные изменения структуры или состава термоэлектродной проволоки. Они возникают благодаря многим причинам и могут быть сгруппированы по следующим признакам:

- взаимодействию термоэлектродов с окружающей средой;
- взаимодействию термоэлектродов с элементами конструкции преобразователя (чехлы, изоляция), а также с материалом оборудования, в котором помещены термодпары;
- взаимодействию термоэлектродов друг с другом;
- внутренним изменениям структуры термоэлектродов под воздействием условий эксплуатации;
- радиоактивному облучению.

Таблица 3.4

Протяженная неоднородность сплавов, мкВ

Сплав	Диаметр проволоки, мм	Номер слитка сплава			
		1-й	2-й	3-й	Всей плавки
Хромель	3,2	15	15	40	50
Хромель	0,7	20	20	40	40
Алюмель	3,2	20	20	10	30
Алюмель	0,7	15	10	15	25
Копель	3,2	15	20	20	40
Копель	0,7	30	20	20	50

Эти же группы причин, кроме третьей, могут иметь место и при эксплуатации термопреобразователей сопротивления.

Масштабы влияния этих причин на характеристики термопар и термопреобразователей сопротивления зависят от степени изменения состава и превращений структуры материалов термоэлектродов. В большой степени они зависят также от температурного поля, взаиморасположения температурного поля и его градиента и участков термоэлектродов, где изменяются структура и свойства. Масштаб возможной протяженной неоднородности сплавов показан в табл. 3.4.

Рассмотрим подробнее группы причин, вызывающие термоэлектрическую неоднородность.

Влияние внешней атмосферы. Эту группу причин можно считать одной из наиболее сильно влияющих на метрологические характеристики, как термопар, так и термосопротивлений. Из компонентов воздушной атмосферы наиболее активно воздействующим является кислород. Влияние кислорода сказывается на характеристиках термоэлектрических сплавов хромель, алюмель, копель и др. Наименьшее воздействие он оказывает на материалы из благородных металлов — платины и платиносодержащих сплавов.

Как правило, при взаимодействии кислорода с никелевыми сплавами, содержащими в качестве добавок хром, марганец, алюминий (хромель, алюмель, нисил, нихросил), с медно-никелевыми сплавами (копель), происходит селективное окисление, которое сопровождается изменением термоЭДС. При сплошном окислении, которое встречается при взаимодействии кислорода с чистыми металлами, например, с медью или никелем в термопреобразователях сопротив-

ления, происходит изменение сопротивления и градуировочной характеристики термопреобразователя сопротивления. Сплошное фронтальное окисление термоэлектродов термопар приводит к небольшому изменению термоЭДС. Однако при этом происходит увеличение их электрического сопротивления, которое может отразиться на работе вторичного преобразователя.

Изменение градуировочных характеристик преобразователей может быть следствием их взаимодействия с азотом и углекислым или другим углеродосодержащим газом. В результате образуются нитриды и карбиды компонентов термоэлектродных сплавов, например, карбид и нитрид хрома. Значительные изменения могут происходить в атмосфере с большим содержанием углеродосодержащих газов и азота.

Термопары из вольфрамениевых сплавов особенно чувствительны к качеству окружающей атмосферы. Основным компонент этих сплавов — вольфрам — интенсивно окисляется на воздухе при температурах выше 400 °С. При еще более высоких температурах он сгорает, чему способствует большая летучесть оксида вольфрама, который из-за его испарения не защищает металл от дальнейшего окисления. При температурах выше 2000 °С происходит взаимодействие вольфрама с газообразным азотом и образование нитрида вольфрама. Взаимодействие с оксидами углерода (СО, СО₂) сопровождается интенсивным образованием оксидов вольфрама и внешнего карбидного слоя. Так как оксиды вольфрама испаряются, на поверхности вольфрама остается слой, содержащий углерод.

Водород не образует гидридов при взаимодействии с вольфрамом, а его растворимость в вольфраме мала. Поэтому можно полагать, что водород не взаимодействует с вольфрамениевыми термоэлектродными и не влияет на их термоэлектрические характеристики. То же самое относится к чувствительному элементу термопреобразователя сопротивления из вольфрама. Однако экспериментальные данные на этот счет в технической литературе не обнаружены.

Присутствие кислорода может вызвать перенос рения вследствие его испарения в виде оксида с одного на другой электрод вольфрамениевой термопары. Изменение состава термоэлектродов вызывает изменение градуировочной характеристики. При 2573 К за 1000 ч это изменение может быть эквивалентно сотням градусов. Селективное испарение рения — основная причина изменения градуировочной характеристики вольфрамениевой термопары. Поэтому преобразователи из сплавов вольфрама следует использовать исключительно в инертной защитной атмосфере или в достаточно глубоком вакууме.

Считается, что количество примесей в инертном газе до 0,001 % об. или давление остаточных газов в вакуумируемой полости 1 Па ($\sim 10^{-2}$ мм рт. ст.) не приемлемо. Давление остаточных газов должно быть не более 10^{-1} Па. Предпочтительно применение сплавов вольфрама в инертной атмосфере, в которой избирательное испарение компонентов протекает медленнее, чем в вакууме.

Наиболее стабильными являются термопары и термосопротивления из платины и платиносодержащих сплавов. Эти материалы устойчивы на воздухе и в других окислительных средах при высоких температурах. Они не взаимодействуют с водородо- и углеродосодержащими газами. Основными причинами изменения градуировочных характеристик термопар из платиновых сплавов являются избирательное испарение (возгонка) родиевого компонента и восстановление оксидных изоляционных материалов, которое происходит в восстановительной среде (например, в водороде). Восстановление оксидов элементов изоляции приводит к росту ее электропроводности и шунтированию сигнала. Поэтому не рекомендуется применять преобразователи из платиновых материалов в восстановительной среде.

Влияние взаимодействия термоэлектродов с изолирующими, защитными и другими материалами. В качестве изолирующих материалов для термопар и термосопротивлений применяют кварц, кремнийорганические составы, оксиды магния (MgO), алюминия (Al_2O_3) и бериллия (BeO). Наиболее химически и термодинамически устойчивым является оксид бериллия, пригодный для применения при температурах до 2500°C (его температура плавления — около 2550°C). Недостатком BeO является высокая токсичность, значительная стоимость, ограниченная номенклатура и доступность изделий из него. Остальные оксиды термодинамически также достаточно устойчивы и не могут быть восстановлены материалом термоэлектродов. Однако, имеющиеся в них примеси могут взаимодействовать с материалами термоэлектродов, изменяя градуировочную характеристику. Например, примесь железа, содержащаяся в оксиде алюминия в количестве до 0,07 % масс., может быть причиной дрейфа платина-платинородиевой термопары до 38°C при уровне температур 1600°C [3]. При содержании железа 0,03 % масс. дрейф в тех же условиях составляет 4°C . Такое же явление наблюдается и в вольфрам-родиевых термопарах с изоляторами из оксида алюминия. Применение оксида бериллия, без примесей железа, резко уменьшает дрейф.

Источниками загрязнений термоэлектродов могут быть металлические защитные чехлы термопар или оболочки термопарных кабелей. Например, защитный чехол термопары из платиновых материалов, изготовленный также из платинородиевого сплава, может служить источником родия, обогащающим этим элементом термоэлектроды термопары.

Отрицательно воздействует на работоспособность платиновых термоэлектродов кремний и его оксид (SiO_2) в восстановительной среде в присутствии углерода и серы. Образующееся соединение Pt_5Si_2 и легкоплавкая эвтектика системы $\text{Pt}-\text{Pt}_5\text{Si}_2$ приводит как к изменению термоэлектрических свойств, так и к резкому ухудшению механических свойств (охрупчиванию) этих материалов. В отсутствие SiO_2 С и S эти термоэлектроды могут работать без ухудшения свойств в водороде при 1600 °С.

Процессы, протекающие в термоэлектродках. Изменение термоЭДС может быть вызвано процессами, протекающими в самих термоэлектродках: релаксация остаточных напряжений, рекристаллизация и т.п. Так, в никельхромовых сплавах (хромель) при нагреве и охлаждении происходит упорядочение структуры сплава, что является причиной обратимой нестабильности термоЭДС. Поэтому максимальное изменение термоЭДС достигает 120—160 мкВ (3—4 °С для хромель-алюмелевых электродов).

Процессы в реальных условиях эксплуатации. В реальных условиях изменение термоЭДС определяется одновременным действием причин, которые обсуждались ранее, и некоторыми специфическими причинами, которые будут рассматриваться далее. Конкретные величины нестабильности зависят также от конструкции термопреобразователей, уровня температур, при которых используется термопара.

В табл. 3.5 [3] перечислены основные причины, воздействующие на стабильность термоЭДС различных типов термопар.

Термоэлектрическая стабильность термоэлектродных сплавов может быть повышена путем термической обработки, целью которой является приближение структуры сплава к равновесному состоянию. Это достигается путем отжига при максимально возможных температурах, вследствие чего обеспечивается полное завершение рекристаллизации. Однако отжиг при высоких температурах не всегда возможен. Например, при высоких температурах проволока из неблагородных сплавов будет сильно окислена и неоднородна, если не принять эффективных мер по защите проволоки от окисления.

Таблица 3.5

Причины нестабильности (дрейфа) термоЭДС термопар различных типов

Причины дрейфа	Термопара			
	ХК	ХА	ПР10/0	BP5/20
Структурные изменения	+	+	+-	++
Превращения	+	+	--	--
Селективное окисление	++	++	+	--
Реакция с изолирующей керамикой	-	-	++	+
Реакция с материалом чехла	-	-	-	+
Взаимодействие электродов	-	-	+	+-
Загрязнение органическими и неорганическими примесями на поверхности чехлов, термоэлектродов, керамики и т.п.	+-	+-	+-	+-
Релаксация эффектов наклепа и остаточных напряжений	+-	+-	+-	+-

Примечание. ХК: среда — воздух, $t = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$, изоляция — фарфор, чехол — сталь; ХА: среда — воздух, $t = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, изоляция — фарфор, чехол — сталь; ПР10/0: среда — воздух, $t = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$, изоляция — Al_2O_3 , чехол — Al_2O_3 ; BP5/20: среда — аргон, $t = 2000\text{ }^{\circ}\text{C}$, изоляция — BeO , чехол — тантал; (--) — дрейф градуировки невозможен; (-) — дрейф возможен, но мал; (+-) — дрейф заметный; (+) — относительно большой дрейф; (++) — основной вклад в дрейф.

Проволока из тугоплавких сплавов в рекристаллизованном состоянии хрупка. Это приводит к тому, что становится трудно изготавливать из нее термопары. Высокотемпературный отжиг может привести к испарению рения из вольфрамрениевого сплава и к изменению градуировочной характеристики термопары. В заводских условиях вольфрамрениевая проволока подвергается отжигу в водородной атмосфере при $1500\text{--}1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 20 с. Практика показывает, что такого отжига не достаточно. Поэтому рекомендуется подвергать такую проволоку дополнительному отжигу при $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 15 мин.

Проволока из хромеля не допускает отжига при повышенных температурах из-за возрастания нестабильности термоЭДС. Поэтому после отжига при высокой температуре ее рекомендуется подвергнуть дополнительному отжигу при $400\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При изготовлении термопар и особенно термосопротивлений из платины и ее сплавов может происходить деформация (пластическая

или упругая) проволоки и изменение ее характеристик. Для их восстановления рекомендуется рекристаллизационный отжиг при температуре выше 1100 °С. Может быть также проведен отжиг в течение часа при 800 °С. Дорекристаллизационный отжиг для более полной стабилизации термоЭДС проводится при 450 °С в течение 16 ч.

Исходная термоэлектрическая неоднородность (ТЭН) термоэлектродной проволоки возникает при ее изготовлении. Она может развиваться в процессе изготовления термоэлектродов и термопар и представляет собой, как правило, небольшие колебания термоЭДС вдоль проволоки. У отработавших некоторое время термопар ТЭН является результатом наложения исходных неоднородностей и неоднородностей, развивающихся в процессе эксплуатации. В зависимости от условий применения термопар величина ТЭН и скорость ее возникновения могут быть различными.

Рассмотрим, как влияет термоэлектрическая неоднородность на термоЭДС термопары [3].

В этом случае абсолютная термоЭДС S является функцией температуры и координаты x по длине проволоки:

$$S(x, T) = \bar{S} + \delta S(x, T),$$

где \bar{S} — среднее значение абсолютной термоЭДС; $\delta S(x, T)$ — ее отклонения, вызванные неоднородностью.

Пусть интегральная термоЭДС возникает на участке проволоки между координатами x_1 и x_2 с градиентом $\nabla T(x)$. Тогда

$$\begin{aligned} E(T_1, T_2) &= \bar{E}(T_1, T_2) + \int_{x_1}^{x_2} \delta S(x, T) \nabla T(x) dx = \\ &= \bar{E}(T_1, T_2) + \int_{T_1}^{T_2} \delta S[x(T), T] \nabla T(x) dT = \bar{E}(T_1, T_2) + \delta E(T_1, T_2). \end{aligned}$$

Из полученного соотношения следует, если протяженность термоэлектрической неоднородности соизмерима с протяженностью неоднородного температурного поля, то влияние неоднородности определяется формой температурного поля.

Таким образом, проявление ТЭН заключается в зависимости показаний термопары не только от разницы температур опорного (холодного) и рабочего спаев, но и от распределения температуры по длине термопары. Отсюда также следует, что показания термопары с

наличием ТЭН при разной глубине погружения в термометрируемую среду могут различаться притом, что температура рабочего спая будет оставаться неизменной [27, 28].

Формы проявления термоэлектрической неоднородности различны. Наиболее простые приведены на рис. 3.3. График 1 на этом рисунке соответствует проволоке, состоящей из двух разнородных кусков, график 2 — куску «чужеродной» проволоки, вставленный в однородную проволоку, график 3 — однородной проволоке, в которую вставлены куски различных по составу и по протяженности отрезков проволоки. Возможны также случаи периодической неоднородности, включая гармоническую неоднородность.

Случайный характер этого явления не позволяет в общем случае заранее исключить погрешность, вызываемую термоэлектрической неоднородностью. Поэтому целесообразно проверять каждую бухту проволоки или каждую термопару на термоэлектрическую неоднородность.

Методы проверки термопарной проволоки на присутствие ТЭН разнообразны [26]. Наиболее простой способ проверки (метод двух сред) заключается в следующем. Термопарная проволока с постоянной скоростью погружается в среду с постоянной температурой, отличающейся от температуры внешней среды, например, из воды комнатной температуры в кипящую воду или в печь с равномерным температурным полем. На границе раздела двух сред возникает скачок температур. При пересечении участка с термоэлектрической неоднородностью границы раздела изменяется термоЭДС, развиваемая термопарой. Если участок полностью погружается в кипящую

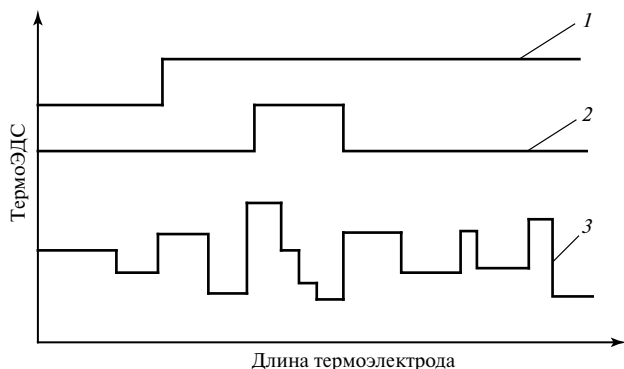


Рис. 3.3. Примеры проявления термоэлектрической неоднородности

воду или в равномерное температурное поле печи, показания термопары возвращаются к исходной величине.

На рис. 3.4 показано проявление ТЭН кабельной термопары типа К (ХА) диаметром 3 мм до отжига (ТЭН отсутствует) и после 20 ч отжига. Отжиг проводился при глубине ее погружения 100 мм при температуре 600 °С — 20 ч; при глубине 150 мм — 15 ч; при глубине 250 мм — 10 ч. Термопара на этих глубинах погружения находилась в среде с равномерным распределением температуры. После отжига было проведено исследование ТЭН термопары от 50 до 300 мм, показания термопары изменились на 1,5 °С.

По результатам многочисленных исследований [28, 29] термопар из неблагородных металлов показано, что наименее подвержены возникновению ТЭН термопары типа N (нихросил-нисил). Исследования показали, что проявление ТЭН термопар типа N в 2—5 раз слабее, чем у термопар типа К. Кроме того, при одинаковых условиях эксплуатации ТЭН кабельных термопар заметно меньше, чем ТЭН тех же незащищенных проволоочных электродов.

В настоящее время в стандартах РФ не предусмотрено требований к значению допустимой ТЭН для термопар из неблагородных металлов (типы К, N и другие). Отсутствие требований связано с двумя основными причинами: сложностью реализации метода достоверного определения проявления ТЭН и не полным пониманием важности знаний о ТЭН и величине возможной ошибки в температурных измерениях, вызываемой наличием ТЭН.

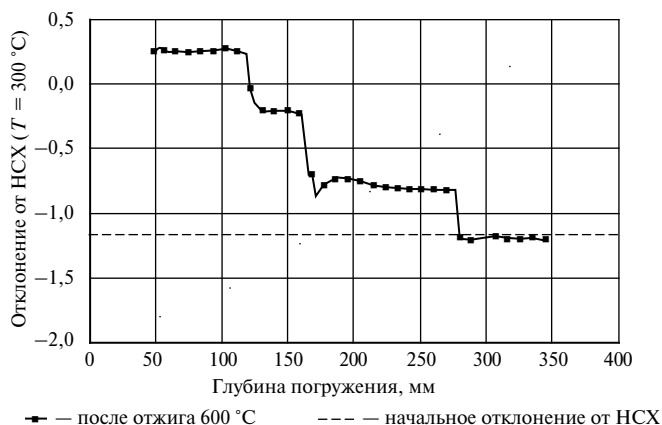


Рис. 3.4. Пример проявления ТЭН термопары типа ХА

Только в ГОСТ Р 52314—2005 [30], описывающем требования к эталонным платиновым термопарам, указаны значения допустимой ТЭН и способ определения данной ТЭН. К сожалению, указанный способ далек от идеального, но он легко реализуем и достаточно корректен для эталонных термопар, применяемых в однотипных трубчатых градуировочных печах. В табл. 3.6 приведены предельные значения ТЭН из ГОСТ Р 52314—2005. Эти значения ТЭН для эталонных термопар определяются как разница показаний термопары при глубинах погружения в печь 250 и 300 мм. При этом предполагается, что именно в этой зоне печи находится «полка» с минимальным градиентом температур. Данный тест адекватен, если термопара затем будет использоваться именно при этих глубинах погружения и в аналогичных температурных полях. Если же термопара, которую считают однородной после проверки в печи, затем применяется в другом температурном поле, то это может привести к ошибке в измерении температуры.

Приведем для примера результаты исследования проявления ТЭН эталонной термопары 2-го разряда (рис. 3.5). При ее очередной проверке неоднородности по методике ГОСТ 8.611—2005 обнаружено не было. При исследовании этой же термопары методом двух сред погружением в флюидизированную среду термостата FB-08 значение обнаруженной ТЭН составило 0,5 °С при 600 °С. Если использовать предположение [31] о линейной зависимости значения ТЭН от температуры, то при 1100 °С значение ТЭН данной термопары будет около 0,9 °С. При этом ТЭН данной термопары расположена в таком месте, в котором ее невозможно обнаружить по методике ГОСТ 8.611—2005.

Таблица 3.6
Допустимая неоднородность эталонных термопреобразователей
при периодической проверке

Тип термопреобразователя	Разряд термопреобразователя	Температура, °С	Неоднородность, °С
ППО	1	1100	0,27
	2		0,54
	3		0,73
ПРО	1	1450	0,57
	2		1,07
	3		1,43

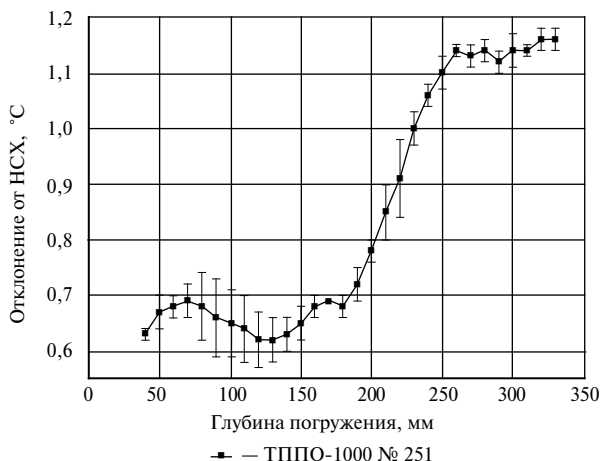


Рис. 3.5. Проявление ТЭН эталонной термопары 2-го разряда:
температура исследования 600 °C

Приведенные данные свидетельствуют о важности учета ТЭН при измерении температуры термопарами. Именно из-за наличия ТЭН во многих иностранных стандартах указано, что не следует проводить повторную калибровку либо поверку термопар из неблагородных металлов после их эксплуатации. В частности, такие требования есть в стандартах ASTM E220-07a [32] и SAE AMS 2750D [33]. В стандарте AMS 2750D указано также, что недопустимо повторно использовать термопару при меньших глубинах погружения, чем она эксплуатировалась ранее. Разрешается использование только на той же или большей глубине.

Приведем еще один пример нецелесообразности проведения периодической поверки в лабораторных условиях. Термопары типа ХА использовались в течение двух лет для измерения температуры паропровода (550 °C) при глубине погружения в измеряемую среду 300 мм. После этого они были подвергнуты поверке в сухоблочном калибраторе (равномерная температурная зона на глубине 50—100 мм; общая глубина погружения 250 мм), а также в термостате с флюидизированной средой (FB-08) при двух глубинах погружения (130 и 300 мм). Результаты представлены на рис. 3.6. Как видно из рис. 3.6, все три результата поверки существенно отличаются друг от друга. Такое различие объясняется наличием ТЭН данной термопары, именно поэтому в различных температурных полях ее термоЭДС различна. Для данной термопары условия поверки в термостате с флюидизиро-

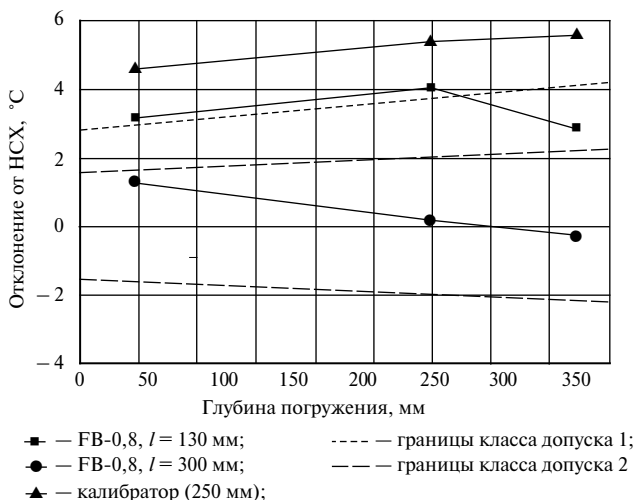


Рис. 3.6. Результаты периодической поверки термопары типа ХА в различных печах и различных глубинах погружения

ванной средой при глубине погружения 300 мм наиболее близки к условиям эксплуатации, поэтому из всех трех поверок наиболее достоверной следует считать именно эту поверку. При поверке в калибраторе на глубине погружения 250 мм и в термостате на глубине погружения 130 мм термопара будет ошибочно забракована.

При любом изменении условий применения термопары, вызывающем изменение распределения температуры по ее длине, например, глубины погружения, на показания термопары неизбежно будет влиять ее неоднородность. В настоящее время практически невозможно предсказать величину данного влияния.

Термоэлектрическая неоднородность может возникать в активной зоне ядерного реактора вследствие влияния радиоактивного облучения на структуру и состав термоэлектродов. При этом неоднородность возникает только в пространстве активной зоны. Если в пределах изменений, вызванных влиянием излучения, температура не изменяется, влияние возникающей термоэлектрической неоднородности отсутствует. Если же изменение температурного поля приходится на зону термоэлектрической неоднородности, следует ожидать влияния неоднородности на сигнал термопары.

Термоэлектрическая неоднородность может проявляться в виде:

- разброса характеристик термопар, изготовленных из проволоки одной бухты (катушки);

- зависимости показаний термопары от глубины погружения в контролируемую среду;
- зависимости показаний термопары от распределения температуры вдоль термоэлектродов;
- нестабильности показаний термопары во время эксплуатации, сопровождаемой изменением термоэлектрической неоднородности.

Вызванная этими проявлениями погрешность не устраняется обычной индивидуальной градуировкой. Избежать такой погрешности можно, лишь градуируя термопару при том же распределении температуры вдоль термоэлектродов, которое термопара будет иметь при эксплуатации.

Из вышеизложенного видно, что при точных измерениях температуры с помощью термопар необходимо тщательно анализировать условия эксплуатации и принимать меры по снижению влияния термоэлектрической неоднородности на показания термопары. Одним из эффективных методов снижения исходной термоэлектрической неоднородности является предварительный отжиг, в результате которого снимаются локальные напряжения, возникающие при протяжке проволоки.

Чистые материалы, используемые в качестве термоэлектродов термопар и обмоток термопреобразователя сопротивления (платина, медь, никель и др.), более однородны, чем сплавы, и при надлежащей чистоте изготовления могут считаться практически однородными. Хотя и в этом случае могут возникать участки с заметной термоэлектрической неоднородностью. При монтаже и в процессе эксплуатации эти материалы могут загрязняться, что приводит к возникновению неоднородности. Кроме того, при изготовлении и монтаже могут возникать механические напряжения, влияющие на градуировку. Особенно склонны к этому платиновые материалы.

Кроме того, следует помнить, что платиновые и платиносодержащие материалы имеют склонность к испарению при температурах выше 1000 °С. Некоторые металлы, содержащиеся в платине в качестве примеси — осмий, иридий, испаряются интенсивней платины. Это приводит к локальному или протяженному изменению состава платиновой проволоки, что вызывает появление термоэлектрической неоднородности. Значение ТЭН для них может достигать до 10 °С.

В технической литературе встречается термин «термоэлектрическая нестабильность». Под этим термином понимается изменение термоэлектрических характеристик термопары в процессе эксплуатации. Причина появления нестабильности заключается в изменении состава термоэлектродов или их структуры и механического состояния.

Можно считать, что нестабильность — это неоднородность, возникающая со временем под воздействием тех или иных причин.

Погрешность из-за дрейфа градуировочной характеристики

Любому преобразователю температуры свойственен дрейф метрологических характеристик вследствие «старения» материала термоэлектродов, возникновения структурных изменений, влияющих на зависимость термоЭДС от температуры и т.д. Экспериментально показано [34], что дрейф хромель-алюмелевой термопары может быть описан формулой

$$\mu[\Delta] = 0,7 - 0,25T - (0,23 + 0,34T) \frac{\tau - 1,3 \cdot 10^4}{1,3 \cdot 10^4},$$

где $\mu[\Delta]$, °C — математическое ожидание отклонения от номинальной статической характеристики (погрешность измерения) в зависимости от приведенной температуры $T = \frac{t, ^\circ\text{C} - 500}{100}$ и времени эксплуатации τ , ч.

Многими экспериментами показано, что термопарам этого типа соответствует Гауссов (нормальный) закон распределения погрешностей. Границы интервалов, в которых находятся отклонения (погрешность) показаний термопар при доверительной вероятности 0,95, описываются уравнением

$$F(^{\circ}\text{C}) = \mu[\Delta] \pm I,$$

$$\text{где } I = 2,376 + 0,198T + 0,198 \frac{\tau - 1,3 \cdot 10^4}{1,3 \cdot 10^4}.$$

Зависимости для отдельных значений времени и температуры эксплуатации в графическом виде представлены на рис. 3.7 и 3.8. Эти зависимости были получены при обработке результатов наблюдений различных партий термопар, изготовленных в разных условиях (в заводских и в лабораторных), исследовавшихся в течение разных интервалов времени вплоть до 61 тыс. ч, в интервале температур от 200 до 600 °C как без облучения, так и при наборе термопарами флюенса нейтронов до $2,4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ ($E > 0,4 \text{ МэВ}$). Отметим, что разброс показаний в зависимости от времени эксплуатации, предсказываемый приведенными зависимостями, меньше допустимых границ, приводимых в старых стандартах. В действующем ГОСТ Р 8.585—2001 временные границы не приводятся.

3.2. Классификация погрешностей измерений

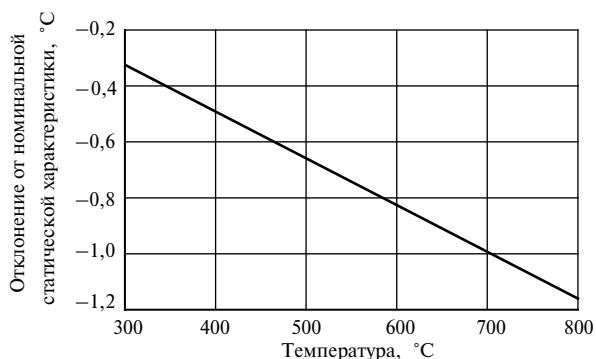


Рис. 3.7. Отклонение (погрешность) математического ожидания показаний термопары типа ХА в зависимости от температуры при времени эксплуатации 10 тыс. ч

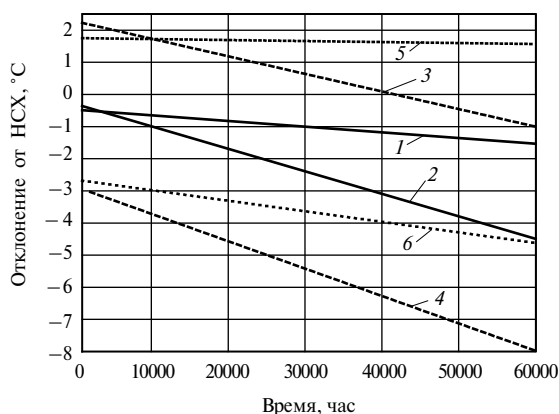


Рис. 3.8. Отклонение (погрешность) показаний термопары типа ХА от номинальной статической характеристики:

1, 5, 6 — математическое ожидание отклонений и доверительные интервалы при температуре 500 °C; 2, 3 4 — математическое ожидание отклонений и доверительные интервалы при температуре 700 °C

В [34] были получены данные о разбросе отклонений показаний термопар сразу после проведения их градуировки. Математическое ожидание и доверительные интервалы при доверительной вероятности 0,95 представлены на рис. 3.9.

В работе [35] приведены результаты наблюдений за изменением градуировочной характеристики термоэлектрического преобразователя термопары типа ХА при температурах 300 и 615 °C в течение 18

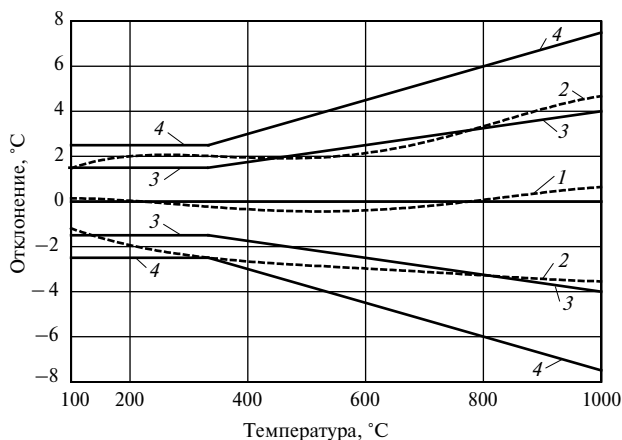


Рис. 3.9. Исходная градуировка термопар типа ХА:

1 — математическое ожидание погрешности; 2 — доверительный интервал погрешности при доверительной вероятности 0,95; 3 — предел допускаемых отклонений по ГОСТ 8.585—2001, класс допуска 1; 4 — то же, класс допуска 2

и 15 тыс. ч соответственно. Испытывались герметичные преобразователи на основе кабеля КТМС (диаметр не указан). Внешней средой для преобразователей был вакуум (параметры не указаны). Количество испытанных преобразователей составило 20 шт., что, по-видимому, достаточно для корректной статистической обработки результатов наблюдений. Эксперименты показали, что дрейф термоЭДС ΔE описывается линейной моделью:

$$\Delta E = a + b\tau,$$

где τ — время; a, b — постоянные коэффициенты.

Значение коэффициентов в [35] не приводятся, однако указывается, что среднее для всего интервала наблюдений изменение термоЭДС за каждые 1000 ч лежит в пределах 0,03—0,17 °С при 300 °С и 0,03—0,125 °С при 615 °С. Таким образом, дрейф термоЭДС по истечении указанного выше времени исследования лежит в пределах 0,54—3 °С при 300 °С и 0,54—1,8 °С при 615 °С, что не превышает 1 % этих температур. Результаты согласуются с данными [34]. Это подтверждает, что дрейф градуировки термопары типа ХА при приведенных параметрах эксплуатации относительно невелик и указывает на то, что вакуумная среда для преобразователей с герметичным защитным чехлом не является решающим фактором, уменьшающим дрейф.

Отсюда следует, что качественно изготовленная из термопара в начале рабочего цикла чаще всего вносит сравнительно небольшой

вклад в погрешность дрейфа характеристик всего измерительного канала.

Часть работы [35] посвящена разработке метода прогнозирования изменения градуировочной характеристики тех же преобразователей на достаточно длительный период упреждения — до 26 тыс. ч. Прогнозирование опиралось на принятую линейную модель дрейфа характеристик термоЭДС. По данным авторов этой работы прогнозируемый «уход» характеристик термоЭДС за 26 тыс. ч не превышает 3,5 °С. Экспериментальное определение дрейфа термоЭДС за такой период — трудоемкое и длительное исследование. Важность этой работы заключается в том, что впервые была показана возможность прогнозирования дрейфа термоЭДС преобразователей на основе существенно меньшего по длительности экспериментального материала. Вместе с тем, следует иметь ввиду, что к таким прогнозным оценкам нужно подходить осторожно.

Погрешность, обусловленная дрейфом градуировочной характеристики термоэлектрических преобразователей в реакторе типа ВВЭР, в основном может быть учтена в виде поправки во время их калибровки, которая проводится во время разогрева и горячей обкатки реактора (см. п. 4.2.1). При этом возможна компенсация дрейфа всего измерительного канала.

Основная проблема при проведении калибровок заключается в оценке действительной температуры в месте расположения рабочих спаев каждого преобразователя. Заманчивое решение этой проблемы — оснащение каждого термопреобразователя реперным металлом (реперной точкой) — пока не выходит из стадии лабораторных исследований. Однако оно широко используется в экспериментальной практике, например, при исследовании влияния излучения на градуировочные характеристики преобразователей.

Анализ экспериментальных данных показывает, что в начале эксплуатации кабельных преобразователей их градуировка может претерпевать положительный дрейф. В ряде случаев это совпадало с диффузией влаги в негерметичном термопарном кабеле по изоляции вверх по направлению к холодному спаю при работе реактора на большой мощности. При дальнейшей эксплуатации иногда наблюдается отрицательный дрейф градуировки. С другой стороны, при анализе результатов градуировки доступного небольшого количества преобразователей с дефектной оболочкой удалось выявить слабый отрицательный дрейф. Возможно, его причиной являлось окисление термоэлектродов.

На градуировку термопар типа ХА радиоактивное облучение не оказывает заметного влияния, по крайней мере, при времени эксплуатации меньшем, чем 10^5 ч, и флюенсах нейтронов не более 10^{21} см $^{-2}$. Одно из объяснений этого состоит в следующем. Термоэлектроды преобразователей надзорного пространства активной зоны почти на всем своем протяжении при калибровке находятся в квазиизотермическом потоке теплоносителя. Основное изменение температуры наблюдается в районе плиты блока защитных труб, т.е. на высоте более чем 6 м от активной зоны. Нейтронный поток в этой области значительно меньше, чем в районе рабочего спая над зоной. Рабочие концы преобразователей существенно охрупчены после эксплуатации лишь на длинах порядка 0,3 м. С другой стороны, отклонения от термоэлектрической однородности, включая отклонения, вызванные радиоактивным облучением, не могут влиять на показания преобразователя, если они находятся в изотермической области [14].

Таким образом, нельзя исключать, что дрейф градуировки надзорных преобразователей связан, в основном, с причинами нерадиационной природы.

Из приведенных данных следует выводы:

1. Независимо от условий и времени эксплуатации термоэлектрических преобразователей в составе ядерных установок, тепловых электростанций и т.п. закон распределения отклонения показаний соответствует нормальному (Гауссовому).

2. Статистические характеристики полученных распределений оказались достаточно консервативными для широкого диапазона условий изготовления и эксплуатации преобразователей.

Это означает, по-видимому, что дрейф преобразователей определяется общими факторами и процессами. Это также означает, что для описания процессов функционирования термоэлектрических преобразователей градуировки термопар типа ХА можно воспользоваться приведенной выше математической моделью. Эти результаты могут быть распространены только на сходные условия эксплуатации преобразователей градуировки термопар типа ХА. При возникновении экстремальных нагрузок по какому-либо параметру (флюенс нейтронов больше 10^{21} см $^{-2}$, вибрационные и другие механические нагрузки, повышенная температура и время эксплуатации и т.п.) погрешности измерений могут существенно возрасти.

Приведенные данные по дрейфу, уходу градуировки термопар типа ХА показывают, что значение дрейфа в ряде технических приложений может оказаться несущественным. Однако дрейф совершенно неприемлем в условиях ядерных энергетических установок с реакторами ВВЭР (см. п. 4.2.1).

Влияние статических электрических и магнитных полей на термоЭДС термопар

Термопары применяют также для измерения температуры в сильных магнитных и электрических полях: в электромашинах и электрогенераторах, электромагнитах, соленоидах, электрических печах большой мощности и т.п. Особенно сильные магнитные поля создаются в термоядерных установках типа «ТОКАМАК» с магнитным удержанием плазмы.

Известны три общих группы взаимной ориентации магнитных и электрических полей и электрического тока и теплового потока, чему соответствуют шесть термомагнитных эффектов [3]:

1. Магнитное поле H перпендикулярно первичному тепловому потоку Q (градиенту температуры T). Возникающий эффект (разность потенциалов или вторичный градиент температуры) направлен, перпендикулярно H и $Q(T)$.

2. Магнитное поле перпендикулярно тепловому потоку. Возникающий эффект совпадает с направлением теплового потока.

3. Магнитное поле и тепловой поток параллельны. Эффект возникает в направлении теплового потока.

Из всех термомагнитных эффектов наибольшее практическое значение имеет эффект магнитотермоЭДС в продольном и поперечных полях. Физически погрешность показаний термопар связана с взаимодействием носителей зарядов — электронов с магнитным полем.

При поперечном эффекте возникает разность потенциалов

$$U^{\perp} = A^{\perp} \Delta_x T B_y b,$$

где B_y — вектор индукции магнитного поля; $\Delta_x T$ — градиент температуры; b — ширина образца (диаметр термоэлектродов); A^{\perp} — коэффициент термомагнитного эффекта материала.

При продольном эффекте возникает разность потенциалов

$$U^{\parallel} = A^{\parallel} a B_y^2 \Delta T,$$

где a — исходное значение коэффициента термоЭДС; A^{\parallel} — коэффициент термомагнитного эффекта материала.

Наибольшие изменения в магнитных полях наблюдаются в ферромагнитных материалах. Ниже представлены изменения абсолютной дифференциальной термоЭДС ΔS ферромагнитных и неферромагнитных материалов в магнитном поле с индукцией $B = 2,7$ Тл при комнатной температуре. При измерениях часть исследуемого про-

водника находилась между полюсами магнита (поле магнита перпендикулярно оси проводника), другая часть — вне поля магнита:

Материал	Медь	Железо	Константан	Хромель	Алюмель
ΔS , пВ/К	1	20 ± 1	3 ± 1	2 ± 1	37 ± 1

Экспериментальные данные об изменениях градуировочных характеристик термопреобразователей в магнитных полях немногочисленны. Так, термопара типа ХА в магнитном поле с $B = 2,7$ Тл при комнатной температуре изменяет свои характеристики на 0,1 %. Большие погрешности были обнаружены в экспериментальном устройстве с электрообогреваемыми стержнями, моделирующими твэл с большими тепловыми потоками. При этом термопары, расположенные в местах, где отсутствовали тепловые потоки, практически не изменяли свои характеристики. В то же время, термопары, расположенные в оболочках нагревателей, в которых градиент температуры составлял 720 К/см, а напряженность магнитного поля — от $8,3 \cdot 10^3$ до $9,6 \cdot 10^3$ А/м, имели погрешность в 150 °С при действительной температуре 120 °С. Эти данные показывают, что следует с осторожностью подходить к измерениям температуры в сильных магнитных и электрических полях.

Данные по влиянию статических электрических и электромагнитных полей немногочисленны. Имеются сведения о том, что в поле $5 \cdot 10^5$ В/см изменения термоЭДС термопары типа ХА при 450 °С не превосходят 1 мкВ (0,025 °С).

При измерениях температуры термопарами в устройствах с переменными электрическими полями, особенно в высокочастотных нагревателях, возникают специфические погрешности двух типов. Первый тип — появление паразитных высокочастотных сигналов (помех), амплитуды которых для термопар типов ХА и МКн могут достигнуть 500—900 мВ. Эти помехи можно устранить путем заземления и другими усовершенствованиями измерительных схем. Второй тип связан с разогревом термоэлектродов в индукционном поле. Возможное значение погрешности в этом случае — несколько милливольт (несколько десятков градусов). Чтобы исключить эту погрешность, измерения нужно производить в паузах, когда высокочастотный индуктор на короткое время отключается. Возможна также защита термопары от воздействия высокочастотного излучения экранированием рабочего спая и термопары в целом.

Наличие в цепи термопары переменного тока может привести к ухудшению чувствительности вторичных преобразователей, используемых для измерения термоЭДС.

Влияние механических нагрузок на термоЭДС

В реальных условиях СИ температуры могут работать под воздействиями внешнего давления, вибрации и ударов. Экспериментально показано, что изменение термоЭДС под воздействием высокого давления меньше термоЭДС, развиваемой при нормальном давлении. Интегральную термоЭДС можно представить в виде [3]:

$$\begin{aligned} E_{T_1}^{T_2}(P) &= \int_{x_1}^{x_2} S(T, p) \nabla_T(x) \, dx = \int_{T_1}^{T_2} S(T) \, dT + \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial S}{\partial p}(T) p(x) \nabla_T(x) \, dx = \\ &= \overline{E}_{T_0}^{T_1} + \Delta E(p, \alpha), \end{aligned}$$

где $S(T, p)$ — дифференциальная термоЭДС, зависящая от температуры и давления; $\overline{E}_{T_0}^{T_1}$ — интегральная термоЭДС, соответствующая стандартной градуировке при нормальном давлении; ΔE — изменение термоЭДС под действием давления; α — параметр, обозначающий зависимость ΔE от взаимного расположения полей температуры $T(x)$ и давления $p(x)$.

Существует аналогия между влиянием взаимного расположения полей давления и температуры и взаимного расположения полей температуры и нейтронных полей (полей радиационных дефектов), рассмотренного выше. Если градиент температур локализован в области постоянного давления, поправка $\Delta E = 0$. Если весь градиент температуры сосредоточен в области высокого давления, эта поправка максимальна. Заметим, что в отличие от термопары термопреобразователь сопротивления может испытывать влияние давления при любом взаиморасположении полей, если, конечно, зависимость электросопротивления от давления имеет место.

Влияние давления на термоЭДС изучено лишь для термопар типов ПР 10/0 и ХА, в некоторой степени — МКн. Из указанных термопар наибольшую абсолютную термоЭДС давления имеет термопара типа МКн. Но, из-за того, что эта термопара развивает большую термоЭДС, ее поправка от давления составляет 3 % при давлении 7 ГПа. В тех же условиях относительная поправка для термопары типа ПР 10/0 составляет 10 %. При давлении 1 ГПа и температуре

1000 °С поправка для термопары типа ХА почти на порядок меньше, чем для термопары типа ПР 10/0.

Влияние давления на значение термоЭДС выражается формулой [3]

$$E = a_1 \Delta T p + a_2 \Delta T p^2 + a_3 (T)^2 p + a_4 \Delta T^3 + a_5 (\Delta T)^2 p^2 + a_6 (\Delta T)^3 p.$$

Здесь E — термоЭДС, мкВ; ΔT — перепад температуры в области высокого давления; p — давление равное 100 МПа. Значения коэффициентов a_i приведены в табл. 3.7.

Влияние давления на термоЭДС может проявиться специфическим образом при взаимодействии газов с термоэлектродами. Окисление, азотирование, карбидизация и другие явления поверхностного слоя термоэлектродов приводят к возникновению продольных напряжений в термоэлектродах вследствие того, что удельные объемы основного сечения термоэлектрода и поверхностного слоя различаются между собой. Некоторые исследователи относят именно к этому механизму влияние на термоЭДС поглощения газов поверхностным слоем термоэлектродов.

Резкое изменение термоЭДС происходит при ударных нагрузках на термопару. Можно было бы предположить, что влияние удара проявляется только в том, что место удара прогревается. Однако немногочисленные данные свидетельствуют о том, что фиксируемый при ударе скачок ЭДС на порядки превышает скачок, обязанный только разогреву термоэлектрода. Было обнаружено, что под действием давления 30 ГПа в термопаре типа МКн возникал скачок термоЭДС 250 мВ, намного превышающий собственную термоЭДС. Механизм влияния удара на показания термопар до сих пор остается

Таблица 3.7

Значения коэффициентов a_i

Коэффициент	Типы термопары и термоэлектрода					
	ПР 10/0	ПР 10	ПлТ	ХА	Х	А
a_1	$0,445 \cdot 10^{-2}$	$0,109 \cdot 10^{-1}$	$0,153 \cdot 10^{-1}$	$-0,267 \cdot 10^{-1}$	$-0,292 \cdot 10^{-2}$	$0,238 \cdot 10^{-1}$
a_2	$0,856 \cdot 10^{-4}$	$-0,361 \cdot 10^{-4}$	$0,495 \cdot 10^{-4}$	$0,130 \cdot 10^{-2}$	$0,716 \cdot 10^{-3}$	$-0,579 \cdot 10^{-3}$
a_3	$0,543 \cdot 10^{-8}$	$-0,603 \cdot 10^{-5}$	$-0,607 \cdot 10^{-8}$	$0,424 \cdot 10^{-4}$	$0,163 \cdot 10^{-4}$	$-0,261 \cdot 10^{-4}$
a_4	$0,973 \cdot 10^{-9}$	$-0,124 \cdot 10^{-7}$	$-0,115 \cdot 10^{-2}$	$-0,117 \cdot 10^{-4}$	$-0,958 \cdot 10^{-5}$	$0,214 \cdot 10^{-5}$
a_5	$-0,106 \cdot 10^{-7}$	$0,104 \cdot 10^{-7}$	$-0,263 \cdot 10^{-9}$	$-0,833 \cdot 10^{-6}$	$-0,298 \cdot 10^{-6}$	$0,535 \cdot 10^{-6}$
a_6	$-0,124 \cdot 10^{-8}$	$0,129 \cdot 10^{-8}$	$0,492 \cdot 10^{-10}$	$0,172 \cdot 10^{-7}$	$0,274 \cdot 10^{-8}$	$0,145 \cdot 10^{-7}$

неясным. В монографии [36] высказано предположение о том, что этот эффект связан с особенностями диффузии электронов через фронт ударной волны, возникающей при ударе.

Одним из факторов, влияющих на развиваемую термоЭДС, является вибрация термоэлектродов. В работе [37] описано влияние вибрации при частотах 10 и 50 Гц и температурах 600—750 °С. Было обнаружено, что максимальная погрешность показаний преобразователей наблюдается при 750 °С и 50 Гц, и что характеристики преобразователей в исследованных условиях более чувствительны к вибрации и одновременному воздействию вибрации и температуры, чем только к температуре.

3.3. Оценка погрешностей измерений температуры

Погрешность однократных измерений. Однократные измерения являются самыми массовыми измерениями. Они обычно проводятся при контроле производственных процессов. Точные измерения в этих условиях возможны, если:

- объем априорной информации об объекте измерения достаточен и определение измеряемой величины не вызывает сомнения;
- метод измерения изучен, и его погрешности устранены или оценены;
- средства измерений исправны и их метрологические характеристики соответствуют установленным нормам.

Если погрешность используемого метода измерений и погрешность, вносимая оператором, меньше 15 % погрешности СИ, за погрешность результата однократного измерения принимают погрешность СИ. Это часто имеет место в производственной практике. При этом подразумевается, хотя специально и не указывается, что доверительная вероятность этой погрешности равна 0,95. Это означает, что 95 % измерений имеют погрешность, не превышающую предельную погрешность СИ.

Погрешности прямых многократных измерений имеют место при проведении экспериментальных и метрологических исследований в целях уменьшения случайной погрешности. Обычно предполагают, что число измерений должно быть не менее четырех [19].

Рассмотрим расчет погрешности и представление результата измерения на примере измерения температуры, когда имеет место только случайная погрешность. Он разбивается на ряд этапов.

1. Определяется среднее арифметическое значение измеренной температуры

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i,$$

где t_i — результат отдельного измерения температуры; n — число измерений.

2. Вычисляется среднее квадратичное отклонение результата измерения

$$S_t = \sqrt{\frac{n}{n-1} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}.$$

3. Рассчитывается среднее квадратичное отклонение среднего арифметического значения

$$S_0 = S_t / \sqrt{n}.$$

4. Определяются доверительные границы (интервалы) случайной погрешности

$$\Delta = \pm Z S_0.$$

Здесь Z — множитель, равный при небольшом числе наблюдений ($n < 30$) коэффициенту Стьюдента. Этот коэффициент выбирается из статистических таблиц, приводимых в книгах по метрологии, в зависимости от числа наблюдений n и выбранной доверительной вероятности P_d . Обычно $P_d = 0,95\%$ означает что 95 % наблюдений находятся внутри доверительных границ.

5. Приводятся результаты измерения

$$t_{\text{изм}} = \bar{t} + \Delta.$$

Одновременно с результатом измерения должны быть указаны число измерений n и выбранная доверительная вероятность P_d . В итоге:

$$t_{\text{изм}} = \bar{t} + \Delta; \quad (n = \dots; P_d = \dots).$$

Приведенный расчет корректен, если случайная погрешность измерений распределяется по закону Гаусса (нормальному закону). Как сказано ранее, результаты измерения температуры в разных условиях и разными СИ распределяются обычно именно по этому закону.

Сложение случайных погрешностей, возникающих при косвенных измерениях, производится по формуле, справедливой для некоррелированных составляющих погрешности [19]

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2},$$

где n — число измерений; Δ_i — погрешность каждого измерения.

Кроме случайной при измерениях может иметь место систематическая погрешность. В этом случае наблюдатель, производящий измерения, должен принять меры к исключению или к минимизации этой погрешности, а также к ее оценке и к введению ее в качестве поправки в результат измерения. Заметим, что систематическая погрешность при измерениях температуры носит обычно методический характер.

Некоторые методы исключения (минимизации) систематической погрешности при измерении температуры рассмотрены в п. 3.2.2. Эффективность учета и исключения систематической погрешности зависит от квалификации наблюдателя, его способности учесть все возможные факторы, влияющие на результат измерения. Очевидно, полностью исключить систематическую погрешность невозможно, хотя бы потому, что ее оценка может быть выполнена также с определенной погрешностью. В этом случае неисключенный остаток погрешности обычно принимается постоянным во всем диапазоне измерения температуры, т.е. принимается равномерное распределение погрешности.

Когда при измерениях имеют место и случайная, и систематическая погрешности, встает вопрос об их суммировании. Такое суммирование следует производить в соответствии с ГОСТ 8.207—76 по следующим правилам.

Если граница неисключенной систематической погрешности θ и оценка среднего квадратичного отклонения результата измерения S связаны соотношением $\theta < 0,8S$, то можно пренебречь систематической погрешностью и учитывать только случайную погрешность. Если $\theta > 0,8S$, то, наоборот, следует пренебречь случайной погрешностью и учитывать только систематическую. В промежуточном

интервале соотношений S и θ предлагается определять границы погрешности результата измерения по формуле

$$\Delta = KS_{\Sigma} = \frac{t_p S + \theta}{S + \sqrt{\sum_{i=1}^m \theta_i^2 / 3}} S_{\Sigma},$$

где t_p — коэффициент Стьюдента; K — коэффициент.

Отметим, что данный подход вызывает определенные нарекания [19], однако другого пока нет.

Актуальным является расчет погрешности измерения температуры с помощью измерительного канала, в состав которого входят первичный преобразователь температуры, линии связи, вторичный преобразователь сигнала температурного преобразователя, показания которого воспринимаются наблюдателем и т.п. Пример такого расчета сделан в докладе [38]. В нем оценивается погрешность построения номинальной статической характеристики кабельных преобразователей температуры методом сличения.

Искомая погрешность рассчитывается по формуле

$$\Delta_{\Sigma} = K \sqrt{\Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 + \Delta_4^2 + \Delta_5^2 + \Delta_6^2},$$

где $K = 1,1$; Δ_1 — абсолютная погрешность преобразователя температуры; Δ_2 — погрешность измерения термоЭДС; Δ_3 — погрешность знания температуры холодных спаев; Δ_4 — погрешность из-за нестабильности поддержания температуры в блоке сравнения; Δ_5 — погрешность из-за разности температур в каналах блока сравнения; Δ_6 — погрешность, обусловленная градиентом температуры по длине блока сравнения.

В этом расчете пренебрегают погрешностями, вызываемыми изменениями свойств электродов во время градуировки, теплоотводом по термопарному кабелю, применением удлиняющих проводов. Соответствующие составляющие погрешности и результирующая погрешность, полученные в конкретном эксперименте, заносят в таблицу:

Составляющая погрешности	Δ_1	Δ_2	Δ_3	Δ_4	Δ_5	Δ_6
Абсолютная погрешность, °C	0,11	0,22	0,03	0,03	0,01	0,02

Общая погрешность в этом случае $\Delta_{\Sigma} \approx 0,32$ °C.

3.3. Оценка погрешностей измерений температуры

Приведем еще один пример определения суммарной погрешности измерительного канала температуры без компенсации температуры свободных концов термопары по методике, разработанной в метрологическом отделе ГНЦ РФ—ФЭИ.

Приведенная суммарная относительная погрешность измерительного канала по ГОСТ 8.207—76 при доверительной вероятности $P_d = 0,95$ определяется

$$\gamma_{\Sigma} = 1,1 \sqrt{\gamma_{\text{осн.т}}^2 + \sum_{i=1}^n \gamma_{\text{осн } i \text{ и}}^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \gamma_{\text{доп } ij \text{ и}}^2 + \gamma_{\text{св.к}}^2}.$$

Здесь $\gamma_{\text{осн.т}}$ — предельная допускаемая погрешность термопары, %; $\gamma_{\text{осн } i \text{ и}}$ — основная предельная погрешность i -го измерительного прибора, %; $\gamma_{\text{доп } ij \text{ и}}$ — дополнительная погрешность i -го измерительного прибора от j -й влияющей величины (определяется по документации на прибор), %; $\gamma_{\text{св.к}}$ — погрешность измерения температуры свободных концов термопары лабораторным термометром, %.

Пример расчета приводится ниже для измерения температуры 1100 °С термопарой ХА и измерительным прибором типа КСП2. Свободные спаи термопары находятся в воздухе, его температура измеряется термометром типа ТЛ (табл. 3.8).

С учетом температуры свободных спаев значение температуры составляет 1137 °С.

Суммарная относительная погрешность измерительного канала, вычисленная по приведенной формуле с учетом данных таблицы, составляет 0,9 % результата измерения, абсолютная погрешность равна 10 °С. В результате измерения температура составляет 1137 ± 10 °С, доверительная вероятность — 0,95.

Таблица 3.8

Исходные данные

Тип прибора	Класс допуска	Предел допускаемых отклонений от НСХ, °С	Основная погрешность		Дополнительная погрешность, %	
			γ , %	Δ , °С	Температура окружающего воздуха	Отклонение напряжения питания
ХА	1	$\pm 0,004T$	$\pm 0,55$	$\pm 4,4$	—	—
КСП2	—	—	$\pm 0,5$	—	0,1	0,25
ТЛ	—	—	—	0,05	—	—

3.4. Понятие о неопределенности измерений

В последние десятилетия в метрологической практике используют понятие «неопределенности измерений», заменяющее «понятие погрешности». В метрологических службах зарубежных стран это понятие полностью вытеснило понятие погрешности и методы его определения. Концепция «неопределенность измерений» введена как обязательное условие при аттестации поверочных лабораторий по международному стандарту ИСО/МЭК 17025.

В настоящее время в некоторые стандарты Российской Федерации, относящиеся к термометрии, введено понятие «неопределенность измерений» вместо термина «погрешность измерений». Хотя не существует указаний на обязательность оценок неопределенности.

Имеются как активные противники такой замены, так и активные приверженцы. Последние обосновывают свою точку зрения тем, что необходимо обеспечить международное единство в подходе к представлению и оцениванию погрешностей результатов измерений, что, безусловно, справедливо. Можно также указать, например, на то, что российские производители преобразователей температуры, поставляющие свою продукцию российским предприятиям, в свою очередь экспортирующим свою продукцию на запад, должны давать оценки именно неопределенности измерения с помощью этих преобразователей.

Одной из причин, вызвавших эту ситуацию, по-видимому, является следующее [39]. Погрешность измерений является разностью между истинным значением измеряемой величины и результатом измерения. Однако истинное значение измеряемой величины всегда неизвестно. Поэтому погрешность измерений как величина также всегда точно неизвестна. Именно поэтому понятию «погрешность» как конкретной величине, имеющей конкретное значение, противопоставляется понятие «неопределенность». В этом понятии отражается сомнение, отсутствие достаточного знания. Вместе с тем, следует отметить, что значение погрешности известно тоже с определенной погрешностью (обычно, 10 %). Существуют доверительные границы, в которых находится результат измерения с заданной доверительной вероятностью. Отсюда видно, что в значении погрешности также отражается сомнение, отсутствие достаточного знания.

Приведем основные понятия:

неопределенность (измерений): параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые могли бы быть обоснованно приписаны измеряемой величине;

стандартная неопределенность (u): неопределенность результата измерений, выраженная в виде среднего квадратичного отклонения;

суммарная стандартная неопределенность (u_c): стандартная неопределенность результата измерений, полученного через значения других величин, равная положительному квадратному корню суммы членов, причем члены являются дисперсиями или ковариациями этих других величин, взвешенными в соответствии с тем, как результат измерений изменяется при изменении этих величин;

расширенная неопределенность (U): величина, определяющая интервал вокруг результата измерений, в пределах которого, как можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли бы быть приписаны измеряемой величине:

коэффициент охвата (k): числовой коэффициент, используемый как множитель суммарной стандартной неопределенности для получения расширенной неопределенности, обычно $k = 2 \div 3$.

Согласно руководству [40, 41] различают оценки неопределенности по типу А, определяемые методом оценивания неопределенности путем статистического анализа ряда наблюдений, и по типу В оцениваемые иным способом, чем статистический анализ рядов наблюдений. Между погрешностями и неопределенностью наблюдается некоторое сходство. Поэтому оценку по типу А называют оценкой случайной погрешности, по типу В — оценкой систематической погрешности.

Основными нормативными документами, касающимися неопределенности измерений являются:

1. Руководство по оцениванию неопределенности в измерении [41]. Документ принят Международной организацией по стандартизации в 1993 г.

2. Рекомендации РМГ 43—2001 ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений» [42].

3. Рекомендации ЕА-4/02. Выражение неопределенности измерения при калибровке [43].

Рекомендации РМГ43—2001 ГСИ и ЕА-4/02 распространяются на методы оценивания погрешности результатов измерений, содержат практические рекомендации по применению Руководства и показы-

вают соответствие между формами представления результатов измерений, принятыми в нормативных документах по метрологии, и формой, принятой в руководстве.

Используемая в настоящее время на практике концепция «неопределенности измерений» позволяет достаточно легко рассчитывать неопределенность измерения как в производственных, так и в лабораторных условиях, и сравнивать результаты измерений, проведенных в различных лабораториях. Знание же неопределенности проведенных измерений позволяет оптимизировать технологические процессы в производстве с большей точностью.

На неопределенность результатов измерений температуры термодарами влияют те же факторы, которые были приведены ранее в разделе о погрешностях измерений.

Учитывая отсутствие в технической литературе примеров расчета неопределенности измерений, а также возрастающую важность знания методов расчета, далее приводится пример определения неопределенности измерения температуры, почерпнутый из практики.

Характеристики источников неопределенности измерений температуры термоэлектрическим преобразователем представлены в табл. 3.9. Бюджет неопределенности составлен в соответствии с руководством [41] и нормативными документами [42 и 43]. Для пояснения вкладов в суммарную неопределенность полезно привести выдержку из Рекомендации РМГ 43—2001 ГСИ, касающуюся неопределенностей типа В: «Наиболее распространенный способ формализации неполного знания о значении величины заключается в постулировании равномерного закона распределения возможных значений этой величины в указанных (нижней и верхней) границах $[(b_{i-}; b_{i+})$ для i -й входной величины], при этом стандартную неопределенность, вычисляемую по типу В — $u_B(x_i)$, определяют по формуле

$$u_B(x_i) = \frac{b_{i-} - b_{i+}}{2\sqrt{3}},$$

а для симметричных границ $(\pm b_i)$ — по формуле

$$u_B(x_i) = \frac{b_i}{\sqrt{3}},$$

где x_i — оценка i -й входной величины.

3.4. Понятие о неопределенности измерений

Таблица 3.9

Источники неопределенности измерений температуры термопарами

Источник неопределенности	Обозначение	Тип и вид распределения неопределенности	Вклад в суммарную неопределенность
Случайные эффекты при измерении	$u_{\text{СКО}}$	Тип А, нормальное распределение	$u_{\text{СКО}}$
Предел допускаемой основной погрешности регистрирующего прибора	$u_{\text{прибора}}$	Тип В, равномерное симметричное распределение	$\frac{u_{\text{прибора}}}{\sqrt{3}}$
Разрешающая способность прибора	$u_{\text{р.с}}$	Тип В, равномерное асимметричное распределение	$\frac{u_{\text{р.с}}}{2\sqrt{3}}$
Погрешность компенсации температуры опорных спаев	$u_{\text{опор}}$	Тип В, равномерное симметричное распределение	$\frac{u_{\text{опор}}}{\sqrt{3}}$
Удлинительные провода	$u_{\text{провода}}$	Тип В, равномерное симметричное распределение	$\frac{u_{\text{провода}}}{\sqrt{3}}$
Расширенная неопределенность индивидуальной статической характеристики термопары	$u_{\text{ТП}}$	$u_{\text{ТП}} = u_{\text{исх}}$ при индивидуальной градуировке ТП; $u_{\text{ТП}} = u_{\text{к.д}}$ в случае поверки ТП на соответствие классу допуска	
Расширенная неопределенность калибровки термопары	$u_{\text{исх}}$	Тип В, нормальное распределение	$u_{\text{исх}}/2$
Расширенная неопределенность класса допуска термопары	$u_{\text{к.д}}$	Тип В, равномерное симметричное распределение	$\frac{u_{\text{к.д}}}{\sqrt{3}}$
Нестабильность термопары за межповерочный интервал	$u_{\text{дрейф}}$	Тип В, равномерное симметричное распределение	$\frac{u_{\text{дрейф}}}{\sqrt{3}}$
Термоэлектрическая неоднородность термопары	$u_{\text{ТЭН}}$	Тип В, равномерное симметричное распределение	$\frac{u_{\text{ТЭН}}}{\sqrt{3}}$
Нестабильность измеряемой температуры	$u_{\text{нестаб}}$	Тип В, равномерное асимметричное распределение	$\frac{u_{\text{нестаб}}}{2\sqrt{3}}$
Тепловой контакт со средой	$u_{\text{печь}}$	Тип В, равномерное симметричное распределение	$\frac{u_{\text{печь}}}{\sqrt{3}}$

Общая расширенная неопределенность измерений температуры u_T определяется по формуле

$$u_T = 2 \sqrt{u_{\text{прибора}}^2/3 + u_{\text{ИСХ}}^2/4 + u_{\text{опор}}^2/3 + u_{\text{провода}}^2/3 + u_{\text{дрейф}}^2/3 + u_{\text{ТЭН}}^2/3 + u_{\text{нестаб}}^2/12 + u_{\text{печь}}^2/3 + u_{\text{р.с}}^2/12 + u_{\text{СКО}}^2} \quad (3.1)$$

при измерении термопарами с индивидуальной градуировкой или

$$u_T = 2 \sqrt{u_{\text{прибора}}^2/3 + u_{\text{к.д}}^2/3 + u_{\text{опор}}^2/3 + u_{\text{провода}}^2/3 + u_{\text{дрейф}}^2/3 + u_{\text{ТЭН}}^2/3 + u_{\text{нестаб}}^2/12 + u_{\text{печь}}^2/3 + u_{\text{р.с}}^2/12 + u_{\text{СКО}}^2} \quad (3.2)$$

при измерении термопарами без индивидуальной градуировки.

Рассмотрим источники неопределенности.

Случайные эффекты при измерении, $u_{\text{СКО}}$. Стандартная неопределенность, связанная со случайными эффектами при измерениях, рассчитывается как среднее квадратичное отклонение (СКО) среднего значения [42]:

$$u_{\text{СКО}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (t_i - t_s)^2}, \quad (3.3)$$

где n — число измерений; t_i — температура в i -м измерении; t_s — среднеарифметическое значение температуры.

Как показывают измерения, проведенные на градуировочной печи МТП-2 и нагревательной печи «НАКАЛ» при числе измерений $n = 30$ в диапазоне температур 300—1100 °С, $u_{\text{СКО}}$ не превышает 0,01 °С.

Неопределенность регистрирующих приборов, $u_{\text{прибора}}$. Для измерения температуры термопарами используются в основном милливольтметры различных модификаций, имеющие классы точности от 0,01 до 1, и миллиамперметры, когда термопара оснащена нормирующим преобразователем тока «напряжение—ток». В исследовательских лабораториях для измерения термоЭДС используются, как правило, милливольтметры с малой неопределенностью измерений, результаты измерений фиксируются в милливольтках. В промышленных измерениях для индикации температуры и ее регулирования

используют более грубые приборы класса 0,25 и ниже, при этом измеренное значение напряжения (в милливольтках) или тока (в миллиамперах) прибор пересчитывает в температуру по номинальной статической характеристике по ГОСТ Р 8.585—2001.

В табл. 3.10 приведены типовые классы точности и пределы допускаемой погрешности регистрирующих приборов. Следует обратить внимание на то, что неопределенность измерительных приборов связана только с характеристиками прибора и описывает способность прибора измерить и преобразовать сигнал от термопары.

Если сигнал термопары преобразуется в сигнал тока нормирующим преобразователем «напряжение—ток» (НП), и затем этот сигнал тока подается на регистрирующий прибор, необходимо учесть как неопределенность НП, так и регистрирующего прибора.

Расширенная неопределенность такой измерительной схемы рассчитывается по формуле

$$u_{\text{прибора}} = 2\sqrt{u_{\text{НП}}^2/3 + u_{\text{пр}}^2/3}, \quad (3.4)$$

где $u_{\text{НП}}$ — доверительная погрешность НП; $u_{\text{пр}}$ — доверительная погрешность регистрирующего прибора.

В данном случае в качестве входных данных используются доверительные погрешности, так как именно они нормированы в документах на указанные приборы. В России обычно применяются НП классов точности 0,1; 0,25; 0,5.

В табл. 3.11 приведена расширенная неопределенность измерительной схемы НП — регистрирующий прибор в зависимости от классов точности обоих приборов для температуры 800 °С.

Таблица 3.10

Неопределенности измерительных приборов

Тип прибора	Класс точности или доверительная погрешность	Расширенная неопределенность прибора при регистрации термопарой типа ХА (расчет для температуры 800 °С)
Милливольтметр МИТ 8.10	$\pm (0,0010 + 10^{-4} U)$ мВ	$\pm 0,11$ °С
Милливольтметр «Теркон»	$\pm (0,0005 + 5 \cdot 10^{-5} U)$ мВ	$\pm 0,06$ °С
Измеритель-регулятор ТРМ	0,5	± 4 °С
Измеритель-регулятор PR	0,05	$\pm 0,4$ °С

Разрешающая способность измерительного прибора, $u_{p.c.}$ Разрешающая способность стандартного цифрового регулирующего прибора, применяемого для технических измерений и регулировки печей, составляет $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Разрешающая способность регистрирующего/самопишущего прибора приблизительно равна $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. В этих случаях вклад разрешающей способности приборов в суммарную неопределенность составляет от $0,03$ до $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Неопределенность компенсации температуры опорных (холодных) спаев $u_{\text{опор}}$ При измерении температуры промышленными измерителями/регуляторами температуры неопределенность, связанная с компенсацией температуры опорного спая, уже включена в класс прибора, а также — в неопределенность нормирующего преобразователя, так как указанные приборы имеют встроенный компенсатор температуры опорных спаев. Однако при использовании более точных измерительных приборов, необходимо оценивать значение данной неопределенности отдельно. Данная компонента имеет большое значение, так как термоЭДС термопары зависит не от температуры рабочего спая, а от разницы температур между рабочим и опорным (холодным) спаем.

Для определения величины компенсации температуры опорного спая используют два способа термостатирования опорных спаев.

Первый способ термостатирования заключается в теплоизоляции опорных спаев и измерении температуры в зоне опорных спаев. Температуру опорных спаев в этом случае измеряют при помощи термометра сопротивления либо при помощи ртутного термометра. Значение термоЭДС, соответствующее температуре опорных спаев, суммируют со значением термоЭДС термопары, суммарная термоЭДС переводится в температуру по таблице номинальных статических характеристик (НСХ) для данного типа термопары. Неопределенность такого варианта компенсации будет равна неопределенности измерения температуры опорных спаев: для термометра сопротивления это значение находится в диапазоне от $\pm 0,15$ до $\pm 0,35\text{ }^{\circ}\text{C}$; для ртутных термометров по ГОСТ 28498—90 — составляет $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ [44].

Второй способ — термостатирование опорных спаев термопар при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для этого обычно используют термостаты со смесью льда и воды либо жидкостные термостаты. При использовании данного способа термостатирования опорных спаев нет необходимости корректировать показания термопары. Этот способ часто используется в метрологических и измерительных лабораториях, но из-за сложности подготовки нулевого термостата и поддержания в должном состоянии смеси льда и воды практически не применяется в

промышленных измерениях. Неопределенность компенсации температуры опорных спаев в этом случае составляет от $\pm 0,01$ до $\pm 0,03$ °C (ГОСТ 8.338—2002, ГОСТ 28498—90).

Неопределенность удлинительной линии, $u_{\text{провода}}$. Об используемых видах и классах удлинительных и компенсационных проводов см. п. 2.2.1, характеристики проводов приведены в табл. 2.4. Значение неопределенности, вносимое удлиняющим проводом, равно отклонению термоЭДС данного провода от номинальной статической характеристики при заданной разнице температур его концов. Так как индивидуальная калибровка проводов для промышленного применения не производится, в качестве величины вносимой неопределенности необходимо брать предел допускаемого отклонения для выбранного класса провода.

Для снижения вклада проводов в итоговую неопределенность ГОСТ 8.338—2002 предписывает использовать для точных измерений или поверочных работ специально отобранные удлиняющие провода. В соответствии с п. 5.2 ГОСТ 8.338—2002 значение термоЭДС при температуре рабочего и свободного концов удлинительного (компенсационного) провода, соответственно равной 100 и 0 °C, не должно отклоняться от значений НСХ более чем на $\pm 0,2 \Delta_{\text{доп}}$, где $\Delta_{\text{доп}}$ — максимально допустимое отклонение от НСХ проводов класса 1 по МЭК 60584-3. В этом случае отклонение от НСХ не должно превосходить значений, указанных в табл. 3.11, 3.12.

Опыт применения удлинительных проводов повышенной точности показывает, что необходимо также определять $\Delta_{\text{доп}}$ не только для температуры 100 °C, но и для температуры 70 °C, 50 °C и особенно для температуры 20—30 °C, так как обычно температура, при которой применяют провода как раз находится в этом диапазоне, и

Таблица 3.11
Неопределенности измерительной схемы типа НП + регистрирующий прибор

Класс точности НП	Расширенная неопределенность		
	Класс точности регистратора		
	0,1	0,25	0,5
0,1	$\pm 1,31$ °C	$\pm 2,49$ °C	$\pm 4,71$ °C
0,25	$\pm 2,49$ °C	$\pm 3,27$ °C	$\pm 5,16$ °C
0,5	$\pm 4,71$ °C	$\pm 5,16$ °C	$\pm 6,53$ °C

Таблица 3.12
Требования ГОСТ 8.338—2002 к удлинительным проводам

Номинальная статическая характеристика	Отклонение от номинальной статической характеристики для термопары типа			
	ХК	ЖК	ХА	НН
$\pm 0,2\Delta_{\text{доп}}$	$\pm 0,5$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$

не всегда провод, соответствующий вышеуказанному требованию при 100 °С, соответствует ему при 30 °С.

При использовании таких проводов их вклад в итоговую неопределенность в 5 раз меньше, чем при использовании обычных проводов класса 1 (далее будем называть такой провод проводом класса 0).

Неопределенности индивидуальных статистических характеристик термопары $u_{\text{НСХ}}$ и $u_{\text{к.д.}}$ Рассмотрим неопределенность $u_{\text{к.д.}}$, связанную с классом термопары, если это термопара общетехническая и не имеет индивидуальной градуировки.

В табл. 3.13 представлены допустимые отклонения от НСХ термопар различных типов, широко используемых в промышленности, в зависимости от значения измеряемой температуры (ГОСТ 6616—94 [45]). Производители термопар гарантируют, что индивидуальные статические характеристики термопары в состоянии поставки находятся в пределах отклонений от НСХ, указанных в табл. 3.1, что подтверждается Свидетельством о первичной поверке.

В качестве значения $u_{\text{к.д.}}$ для технических термопар берется предельно допустимое отклонение от НСХ для термопар соответствующего типа в зависимости от класса допуска.

Таблица 3.13
Допустимое отклонение от номинальной статической характеристики термопар различных типов

Тип термопары	Пределы допускаемых отклонений от номинальной статической характеристики для термопары	
	Класс 1	Класс 2
К, N	$-40 \div 375 \quad \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$	$-40 \div 333 \quad \pm 2,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
	$375 \div 1300 \quad \pm 0,004t \text{ } ^\circ\text{C}$	$333 \div 1300 \quad \pm 0,0075t \text{ } ^\circ\text{C}$
R, S	$0 \div 1100 \quad \pm 1,0 \text{ } ^\circ\text{C}$	$0 \div 600 \quad \pm 1,5 \text{ } ^\circ\text{C}$
	$1100 \div 1600 \quad \pm [1,0 + 0,003(t - 1100)] \text{ } ^\circ\text{C}$	$600 \div 1600 \quad \pm 0,0025t \text{ } ^\circ\text{C}$

Значительной ошибкой многих пользователей термопар является использование только данной компоненты неопределенности, связанной с термопарой, при расчете итоговой неопределенности измерения температуры.

При использовании термопары с индивидуальной градуировкой в качестве неопределенности индивидуальной статической характеристики термопары необходимо применять значение расширенной неопределенности индивидуальной градуировки $u_{\text{ИСХ}}$. При индивидуальной градуировке определяется поправка к показаниям термопары, позволяющая существенно повысить точность измерений температуры. Данную поправку применяют весь период времени до следующей градуировки.

В современных калибровочных лабораториях обеспечивается неопределенность градуировки термопар типов К и N, равная $\pm 0,45 \div \pm 1,80$ °C при температурах 0—1100 °C, в зависимости от применяемых средств калибровки и значения верхнего предела температуры градуировки.

Нестабильность за межповерочный интервал, $u_{\text{дрейф}}$. В ГОСТ 6616—94 указано, что изменение индивидуальной статической характеристики (ИСХ) термопар за 2 ч выдержки при максимальной температуре не должно превышать половины значения класса допуска. Другие численные требования к дрейфу технических термопар ни одним действующим нормативным документом не регламентируются.

Однако термопары, как и любые другие средства измерений, характеризуются изменением метрологических характеристик в процессе эксплуатации.

Общие методы определения МПИ СИ изложены в межгосударственных рекомендациях по стандартизации РМГ 74—2004 [46]. Рекомендации описывают методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов, основанные на предположении о непрерывном (с конечной случайной скоростью) изменении метрологических характеристик СИ в процессе их эксплуатации или хранения, определяют критерии установления МПИ и алгоритм его вычисления.

Согласно РМГ 74—2004, наиболее предпочтительными являются испытания партии СИ для оценки их нестабильности (метрологической надежности). Эти испытания могут быть проведены специально (в нормальном или форсированном режиме эксплуатации), совмещены с контрольными испытаниями на надежность либо проведены путем подконтрольной эксплуатации установочной партии.

Для проведения испытаний формируют партию СИ. Объем партии должен быть не менее 30 (РМГ 74—2004, п. А.2.1). Отобранную партию СИ подвергают испытаниям в обычном или ускоренном (с известным коэффициентом ускорения) режиме. Через равные промежутки времени эксплуатации или наработки проводят измерения контролируемых параметров.

Суть расчетного метода заключается в получении аппроксимирующего полинома по экспериментальным данным изменения ИСХ группы термопар типа ХА во времени. Результаты испытаний термопары типа ХА при температуре 600 °С показаны на рис. 3.10. При этом рассчитывается среднее квадратичное отклонение для исследуемой группы и определяется характер изменения среднего квадратичного отклонения со временем. Межповерочный интервал определяется по графику как абсцисса места пересечения аппроксимирующего полинома, построенного с учетом среднего квадратичного отклонения, и границы допуска для исследуемой группы с учетом неопределенности выполнения измерений при доверительной вероятности 95 %.

На рис. 3.11 приведены данные, полученные в ходе выполнения работы при ресурсном отжиге термопар типа НН. Результаты подтверждают существенно лучшую стабильность термопар типа НН.

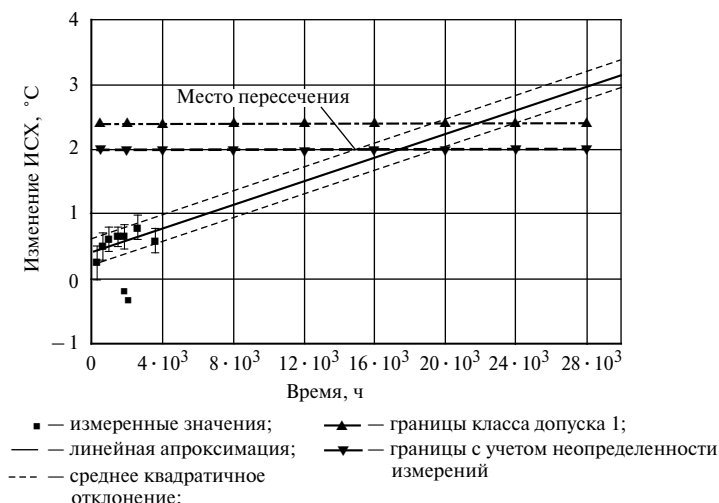


Рис. 3.10. Пример определения межповерочного интервала термопары типа ХА

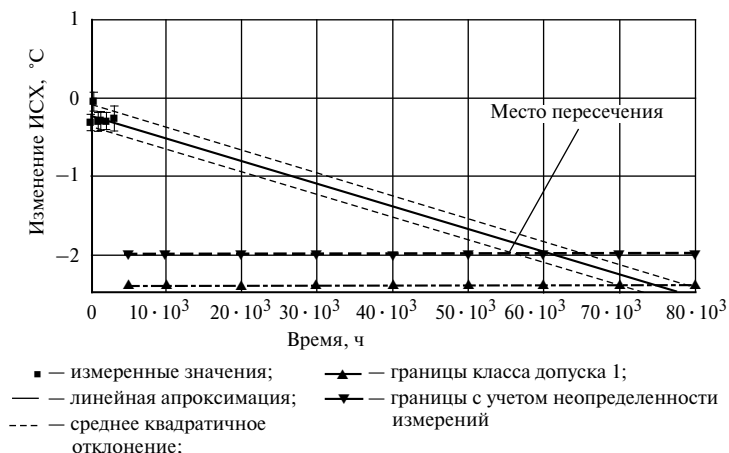


Рис. 3.11. Пример определения межповерочного интервала терморезистора типа ТН интегральной компоновки

Таким образом, при назначении МПИ по действующему нормативному документу РМГ 74—2004 не подразумевается нахождение ИСХ терморезистора в границах класса допуска весь период МПИ. Гарантируется лишь то, что изменение ИСХ терморезистора не превысит класса допуска с учетом среднего квадратичного отклонения и неопределенности выполнения измерений.

Так как законы изменения ИСХ терморезисторов в зависимости от условий и времени эксплуатации на сегодняшний день практически отсутствуют то, основываясь на методике определения МПИ по РМГ 74—2004, за величину $u_{\text{дрейф}}$ можно брать допустимое значение предела допустимого отклонения терморезистора конкретного класса: 3,2 °C — для терморезисторов типов ХА (К) и ТН (N) класса 1 и 6 °C — для аналогичных ТР класса 2 (при температуре 800 °C). Предел допустимого отклонения для всех типов терморезисторов рассчитывается по ГОСТ Р 8.585—2001. Это приближение незначительно грубее предельного значения допустимого дрейфа по РМГ 74—2004, но в расчетах данное приближение значительно удобнее использовать. Например, для терморезистора типа ХА класса допуска 1, используемой при 800 °C, изменение ИСХ за МПИ может составить до 3,2 °C. Если начальная градуировка терморезистора была в отрицательной области, ИСХ терморезистора останется в пределах класса допуска 1, если же ИСХ было, например, +3 °C и дрейф составил +3,2 °C, то после истечения МПИ ИСХ терморезистора окажется за границами даже класса допуска 2.

Термоэлектрическая неоднородность термопары $u_{\text{ТЭН}}$. Значительный вклад в неопределенность измерения температуры может вносить термоэлектрическая неоднородность (ТЭН), приводящая к изменению термоэлектрических свойств термопары по ее длине. В термопарах из неблагородных металлов (особенно для типа ХА) ТЭН возникает уже после первых десятков часов использования [25].

При любом изменении условий применения термопары, вызывающем изменение распределения температуры по ее длине, например, глубины погружения, на показания термопары неизбежно будет влиять ее неоднородность. В настоящее время практически невозможно предсказать величину данного влияния. В связи с этим $u_{\text{ТЭН}}$ численно в расчетах далее не учитывается, но всегда надо помнить, что неоднородность может вызвать увеличение суммарной неопределенности измерений температуры от 10 до 100 % и более.

Нестабильность измеряемой температуры, $u_{\text{нестаб}}$. Стандартная неопределенность, связанная с нестабильностью температуры в печи за время всех измерений

$$u_{\text{нестаб}} = \frac{t_{\text{max}} - t_{\text{min}}}{2\sqrt{3}}, \quad (3.5)$$

где t_{max} и t_{min} — соответственно максимальная и минимальная температура, измеренная эталонным датчиком за время проведения всех измерительных циклов.

По результатам испытаний градуировочной печи МТП-2 и нагревательной печи «НАКАЛ» было определено, что скорость изменения температуры в рабочей зоне печи не превышает 0,1 °С/мин. В технологических печах стабильность поддержания температуры существенно хуже и не может быть оценена значением менее 1 °С.

Тепловой контакт со средой, $u_{\text{печь}}$. Согласно требованиям установки термопар на объекте необходимо, чтобы термопара была погружена в термометрируемую среду на глубину большую или равную минимальной глубине погружения для данной конструкции преобразователя. При отсутствии данных о минимальной глубине погружения необходимо, чтобы рабочая часть термопары находилась в изотермической зоне термометрируемого объекта и была длиной не менее 15 диаметров термопары. При этих условиях отклонение показаний термопары от температуры объекта и соответственно расширенная неопределенность за счет характеристик теплового контакта термопары со средой $u_{\text{печь}} = 0$.

3.5. Примеры расчета расширенной неопределенности измерений температуры термопарами

Все примеры, которые будут приведены ниже, рассчитывались для следующих условий:

- измеряемая температура 800 °С;
- максимальная температура на удлинительном проводе не превосходит допустимого значения для данного класса и типа провода;
- измерительный прибор и/или нормирующий преобразователь находится в нормальных условиях эксплуатации (температура и влажность соответствуют нормируемым значениям);
- $u_{\text{СКО}}$ не превышает 0,01 °С;
- разрешающая способность стандартного цифрового регулирующего прибора, применяемого для технических измерений и регулирования печей, равна 0,1 °С, разрешающая способность регистрирующего/самопишущего прибора — 1 °С;
- изменение температуры за время проведения измерений не превышает 1 °С;
- обеспечен тепловой контакт термопары с термометрируемой средой, $u_{\text{печь}} = 0$.

Технические измерения

В промышленных условиях для измерения температуры используют три варианта измерительных схем. Ниже приведены результаты расчетов неопределенности для каждой из них. Термоэлектрическую неоднородность необходимо учитывать, если в процессе работы термопара используется в различных температурных полях. Если условия использования термопары неизменны, влиянием ТЭН можно пренебречь.

Схема 1 представлена на рис. 3.12. В данной схеме используются термопары с классом допуска 1 и 2, приборы классов 0,25 и 0,5.

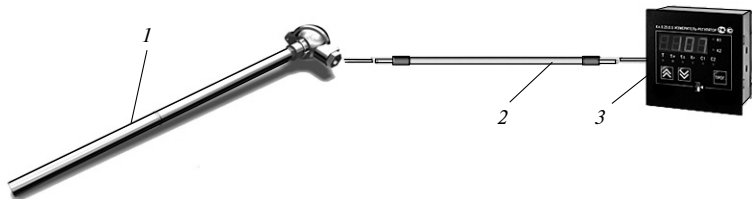


Рис. 3.12. Измерительная схема 1:

1 — термопара; 2 — удлинительный провод; 3 — прибор

Таблица 3.14

Расширенная неопределенность измерений температуры для схемы 1

Класс термопары	Класс провода	Класс прибора	Расширенная неопределенность измерений, °C (расчет для температуры 800 °C)
1	1	0,25	± 6,1
1	1	0,5	± 7,3
1	2	0,25	± 6,5
1	2	0,5	± 7,6
2	2	0,25	± 10,6
2	2	0,5	± 11,3

Длина удлинительных проводов может достигать нескольких сотен метров.

В табл. 3.14 приведены результаты расчета расширенной неопределенности результатов измерений температуры 800 °C для различных комбинаций компонент схемы. Расчет проводился по (3.2)

$$u_T = 2 \sqrt{u_{\text{прибора}}^2/3 + u_{\text{к.д}}^2/3 + u_{\text{опор}}^2/3 + u_{\text{провода}}^2/3 + u_{\text{дрейф}}^2/3 + u_{\text{ТЭН}}^2/3 + u_{\text{нестаб}}^2/12 + u_{\text{печь}}^2/3 + u_{\text{р.с}}^2/12 + u_{\text{СКО}}^2},$$

где $u_{\text{СКО}} = \pm 0,01$ °C; $u_{\text{прибора}} = \pm 2$ °C для приборов класса 0,25 и ± 4 °C для приборов класса 0,5; $u_{\text{к.д}} = \pm 3,2$ °C для ТП класса 1 и ± 6 °C для ТП класса 2; $u_{\text{опор}} = 0$ °C; $u_{\text{провода}} = \pm 1,5$ °C для провода класса 1 и $\pm 2,5$ °C и для провода класса 2; $u_{\text{дрейф}} = \pm 3,2$ °C для ТП класса 1 и ± 6 °C для ТП класса 2; $u_{\text{ТЭН}} = 0$ °C; $u_{\text{нестаб}} = 1$ °C; $u_{\text{печь}} = 0$ °C; $u_{\text{р.с}} = 1$ °C.

Схема 2 представлена на рис. 3.13. В данной схеме отсутствует удлинительный провод, сигнал в виде постоянного тока от нормирующего преобразователя (НП) передается по обычному медному проводу, соответственно в бюджете неопределенности нет компоненты, связанной с характеристиками удлинительного провода. При этом надо помнить, что стандартная неопределенность, связанная с приборной частью (как указано в п. 3.4.2), состоит из двух компонент и

равняется $u_{\text{прибора}} = \sqrt{u_{\text{НП}}^2/3 + u_{\text{пр}}^2/3}$. Все остальные рассуждения по вычислению бюджета неопределенности сохраняются как и в первом случае. Результаты расчета представлены в табл. 3.15.

3.5. Примеры расчета расширенной неопределенности измерений

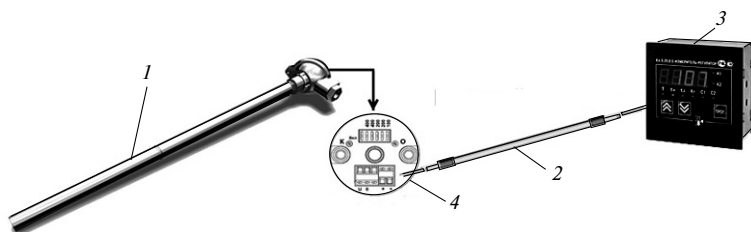


Рис. 3.13. Измерительная схема 2:

1 — термопара; 2 — медный провод; 3 — прибор; 4 — нормирующий преобразователь

Таблица 3.15
Расширенная неопределенность измерений температуры для схемы 2

Класс термопары	Класс нормирующего преобразователя	Класс прибора	Расширенная неопределенность измерений, °C (расчет для температуры 800 °C)	
			Совместная поверка термопары и нормирующего преобразователя	Отдельная поверка термопары и нормирующего преобразователя
1	0,25	0,25	±5,0	±6,2
1	0,25	0,5	±6,4	±7,4
1	0,5	0,25	±6,4	±7,4
1	0,5	0,5	±7,5	±8,4
2	0,25	0,25	±7,7	±10,4
2	0,25	0,5	±8,7	±11,1
2	0,5	0,25	±8,7	±11,1
2	0,5	0,5	±9,6	±11,8

Следует отметить, что многие нормирующие преобразователи устанавливаемые непосредственно на термопары, имеют возможность подстройки под ИСХ термопары. Для такой подстройки проводится корректировка показаний нормирующего преобразователя в метрологической лаборатории: изменяются настройки начального тока «0» и наклон передаточной характеристики « k ». Процедура совместной калибровки нормирующего преобразователя и термопары подробно описана в МИ 2356—2001. Преимуществом совместной настройки является то, что в бюджете неопределенности измерений такой термопарой $u_{\text{ТП}}$ следует брать близкой к 0. В табл. 3.15 приведены результаты расчета расширенной неопределенности для пер-

вичных совместной и отдельной поверок первичного нормирующего преобразователя и термопреобразователя. Расчет произведен для тех же параметров, что и для схемы 1.

Схема 3 представлена на рис. 3.14. Из всех используемых измерительных схем для промышленных измерений температуры, схема 3 имеет наибольшее количество составляющих и, как следствие, наибольшие неопределенности измерений для ее вариантов. Как и в предыдущей схеме $u_{\text{прибора}}$ является составной величиной. Результаты расчетов представлены в табл. 3.16.

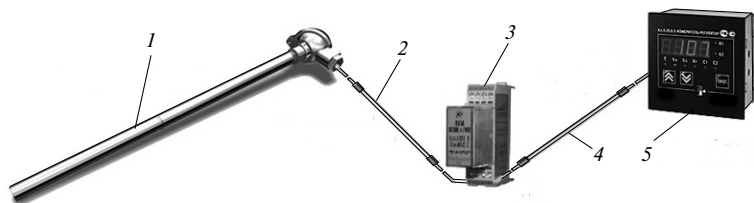


Рис 3.14. Измерительная схема 3:

1 — термопара; 2 — удлинительный провод; 3 — нормирующий преобразователь; 4 — медный провод; 5 — прибор

Таблица 3.16

Расширенная неопределенность измерений температуры для схемы 3

Класс термопары	Класс провода	Класс нормирующего преобразователя	Класс прибора	Расширенная неопределенность измерений, °C (расчет для температуры 800 °C)
1	1	0,25	0,25	±6,5
1	1	0,25	0,5	±7,6
1	1	0,5	0,25	±7,6
1	1	0,5	0,5	±8,6
1	2	0,25	0,25	±6,9
1	2	0,25	0,5	±7,9
1	2	0,5	0,25	±7,9
1	2	0,5	0,5	±8,9
2	2	0,25	0,25	±10,8
2	2	0,25	0,5	±11,5
2	2	0,5	0,25	±11,5
2	2	0,5	0,5	±12,2

Лабораторные измерения

Существенным отличием лабораторных измерений от технических является применение милливольтметров и отдельных вспомогательных средств для компенсации температуры опорных спаев термопар. На рис. 3.15 приведена типичная лабораторная схема измерений.

Термостат соединен с измерительным прибором медным проводом. Для уменьшения неопределенности измерений используют откалиброванные удлинительные провода (ASTM International вынесла на утверждение в 2009 г. проект стандарта по калибровке удлинительных проводов). При этом при каждом измерении фиксируется температура перехода от термопары на удлинительный провод и делается поправка именно для данной температуры. Использование термопар, отградуированных с конкретным проводом, без внесения дополнительной поправки допустимо только если температуры перехода на провод при градуировке и при использовании термопары не различаются более, чем на 1 °С. Разница температур места перехода 5 °С может изменять показания термопары на значения порядка 0,5 °С, что весьма велико для высокоточных лабораторных измерений. При использовании некалиброванных удлинительных проводов необходимо учитывать неопределенность, связанную с ними (до 1,5 °С для проводов класса 1). Поэтому эталонные платиновые термопары используются без удлинительных проводов, в смесь льда и воды заводятся непосредственно термоэлектроды термопар.

Расчет расширенной неопределенности производился по (3.1):

$$u_T = 2 \sqrt{u_{\text{прибора}}^2/3 + u_{\text{ИСХ}}^2/4 + u_{\text{опор}}^2/3 + u_{\text{провода}}^2/3 + u_{\text{дрейф}}^2/3 + u_{\text{ТЭН}}^2/3 + u_{\text{нестаб}}^2/12 + u_{\text{печь}}^2/3 + u_{\text{р.с}}^2/12 + u_{\text{СКО}}^2}.$$

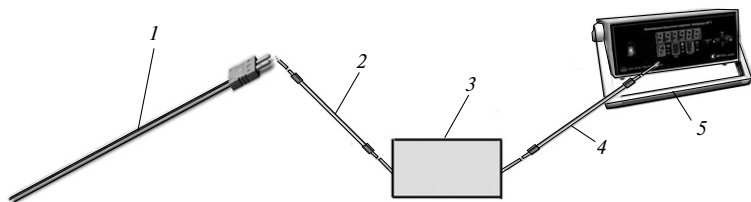


Рис 3.15. Лабораторная схема измерений:

1 — термопара; 2 — удлинительный провод; 3 — термостат; 4 — медный провод; 5 — прибор

В табл. 3.17 приведены результаты расчета неопределенности измерений температуры 800 °С эталонными нихросил-нисиловыми кабельными термопарами типа КЭТНН и эталонными платиновыми термопарами ТППО различных разрядов. В качестве измерительного прибора везде использовался милливольтметр МИТ 8.10. Значение дрейфа за МПИ для платиновых термопар — по ГОСТ Р 52314—2005, значение ТЭН взято равной 0,5 °С, что вполне реально, исходя из полученных экспериментальных данных. Расширенная неопределенность термопар типа КЭТНН указана с учетом неопределенности их градуировки, значений дрейфа и возможной ТЭН.

Как видно из табл. 3.17, незначительная ТЭН может существенно изменить расширенную неопределенность измерений (до 50 %). Чем выше точность желательно получить, тем больший вклад дает даже незначительная ТЭН (30 % для термопары типа ТППО 1-го разряда). При этом всегда надо помнить, что в реальных задачах значение ТЭН может быть существенно больше.

Таблица 3.17

**Данные расчета неопределенности измерений температуры 800 °С
эталонными термопарами**

Вип термопары	Неопределенность градуировки, °С	Класс провода	Расширенная неопределенность измерений, °С			
			без ТЭН	с учетом ТЭН		
			Неопределенность компенсации $t_{\text{опорная}}$, °С			
			0,02	0,2	0,02	0,2
КЭТНН	1,2	1	1,87	1,88	2,22	2,23
		0	0,78	0,82	1,43	1,45
		Калиброванный провод	0,71	0,75	1,40	1,41
ТППО 1-го разряда	0,5	—	0,68	0,72	0,89	0,92
ТППО 2-го разряда	0,7	—	1,02	1,04	1,17	1,19
ТППО 3-го разряда	1,5	—	1,86	1,87	1,94	1,96

Примечание. ТЭН — термоэлектрическая неоднородность

Точные технические измерения

Делая первый шаг к повышению точности технических измерений, обычно выбирают более точный регистрирующий прибор, например класса 0,1, а также проведение индивидуальной калибровки термопары. Схему измерений при этом не изменяют. Рассмотрим данный подход более подробно на примере 1-й схемы. Схема измерений состоит из термопары с индивидуальной градуировкой, провода термопары класса 1 и регистрирующего прибора с классом точности 0,1.

Термопара, имеющая индивидуальную градуировку, позволяет ввести поправку к измеренной с ее помощью температуре. Будем считать, что известна поправка к термопарам в начальный момент использования. Данную поправку можно и следует использовать весь период времени до следующей поверки, при этом обязательно надо учитывать возможный дрейф термопары за МПИ.

В качестве значения неопределенности ИСХ термопары $u_{\text{ИСХ}}$ в данном случае необходимо брать значение расширенной неопределенности индивидуальной градуировки. В лаборатории, оснащенной современными средствами измерений, возможно обеспечить неопределенность градуировки термопар типов ХА (К) и НН (N) равную $\pm 0,45 \div \pm 1,80$ °С при температурах от 0 до 1100 °С в зависимости от применяемых средств поверки и значения верхнего предела температуры градуировки.

Как уже было сказано, всегда необходимо учитывать дрейф ИСХ термопар. Значение этого дрейфа не зависит от того, обычная это термопара или термопара с индивидуальной градуировкой. За значение дрейфа, как и для обычных термопар, взято значение максимально допустимого отклонения ИСХ от НСХ для термопары конкретного класса и при измеряемой температуре. Результаты расчетов для температуры 800 °С приведены в табл. 3.18.

Расчет производился по (3.1)

$$u_T = 2 \sqrt{u_{\text{прибора}}^2/3 + u_{\text{ИСХ}}^2/4 + u_{\text{опор}}^2/3 + u_{\text{провода}}^2/3 + u_{\text{дрейф}}^2/3 + u_{\text{ТЭН}}^2/3 + u_{\text{нестаб}}^2/12 + u_{\text{печь}}^2/3 + u_{\text{р.с}}^2/12 + u_{\text{СКО}}^2},$$

где $u_{\text{СКО}} = \pm 0,01$ °С; $u_{\text{прибора}} = \pm 0,8$ °С для приборов класса 0,1 и $\pm 2,0$ °С для приборов класса 0,25; $u_{\text{ИСХ}} = \pm 0,8$ °С для термопар с индивидуальной градуировкой; $u_{\text{опор}} = 0$ °С; $u_{\text{провода}} = \pm 0,3$ °С для

Таблица 3.18

Расширенная неопределенность измерений повышенной точности по схеме 1

Тип термопары	Класс провода	Класс прибора	Расширенная неопределенность измерений, °C (расчет для температуры 800 °C)
ХА, НН индивидуальная градуировка	0	0,1	$\pm 4,0$
ХА, НН индивидуальная градуировка	1	0,1	$\pm 4,3$
ХА, НН индивидуальная градуировка	0	0,25	$\pm 4,5$
ХА, НН индивидуальная градуировка	1	0,25	$\pm 4,8$
ПП (R), ПП (S) класс 1	0	0,1	$\pm 1,9$
ПП (R), ПП (S) класс 1	1	0,1	$\pm 2,6$
ПП (R), ПП (S) класс 1	0	0,25	$\pm 2,9$
ПП (R), ПП (S) класс 1	1	0,25	$\pm 3,3$
ПП (R), ПП (S) класс 2	0	0,1	$\pm 2,6$
ПП (R), ПП (S) класс 2	1	0,1	$\pm 3,1$
ПП (R), ПП (S) класс 2	0	0,25	$\pm 3,3$
ПП (R), ПП (S) класс 2	1	0,25	$\pm 3,7$

проводов класса 0 и $\pm 1,5$ °C для проводов класса 1; $u_{\text{дрейф}} = \pm 3,2$ °C для ТП класса 1; $u_{\text{ТЭН}} = 0$ °C; $u_{\text{нестаб}} = 1$ °C; $u_{\text{печь}} = 0$ °C; $u_{\text{р.с}} = 0,1$ °C.

Также в табл. 3.18 приведены результаты расчета неопределенности при использовании в схеме измерений высокоточного провода класса 0 и измерительных приборов повышенной точности. Использование такого провода улучшает точность измерений примерно на

20 % для постоянных измерений температуры термопарами из неблагородных металлов.

Для сравнения в таблице приведены результаты расчета неопределенности измерений температуры платиновыми термопарами типов ПП(R) и ПП(S) различных классов допуска без индивидуальной градуировки. Все расчеты проведены в предположении о неизменности условий эксплуатации термопар, и в эти расчеты не включено влияние ТЭН. Основной причиной этого является крайне сложная природа возникновения и развития ТЭН в термопарах и невозможность ее количественного учета в неизвестных условиях применения.

Дрейф термопар вносит существенный вклад в общую неопределенность измерений. Помимо этого, если изменить условия эксплуатации термопары, например, глубину погружения, дополнительный вклад внесет ТЭН. Значение этого вклада может быть весьма существенным и достигать 5—10 °С. Таким образом, ТЭН и дрейф являются основными причинами снижения точности измерений. К сожалению, многие пользователи термопар не осознают важность учета в расчетах дрейфа и влияния ТЭН, а принимают во внимание только неопределенность градуировки термопар, влияние параметров прибора и проводов.

Рекомендации по снижению неопределенности (погрешности) измерений температуры термопарами

Приведем простые правила, следуя которым можно рассчитывать на минимальные потери в точности измерения температуры.

1. Размещайте приборы в чистом сухом помещении при соответствующей температуре.
2. Устанавливайте термопару так, чтобы исключить ошибки, связанные с теплоотводом.
3. Используйте правильный тип удлинительных проводов с соответствующими размерами, изоляцией и защитой. Применяйте провода класса 1.
4. При возможности, проводите регулярную бездемонтажную калибровку термопар по месту использования, это позволит снизить неопределенность измерений.
5. Прокладывайте удлинительные и компенсационные провода вдали от энергетических кабелей.
6. Используйте максимально толстые проводники, не отводящие тепло от измеряемой зоны.

7. При необходимости прокладки длинных линий, применяйте датчики с нормирующими преобразователями на ток 4—20 мА. Слаботочные сигналы менее подвержены электромагнитному воздействию.

8. Защищайте цепи от источников шумовых помех, шире используйте экранирование цепей и фильтрацию сигналов для снижения уровня высокочастотных помех.

9. Исключайте превышение температурного предела головки и удлинительных и компенсационных проводов.

10. Устанавливайте приборы как можно ближе к термопаре.

11. Присоединяйте приборы к «чистой» (без помех) электрической сети с нужными напряжением и частотой.

12. Приборы должны быть хорошо заземлены.

13. Правильно используйте тип термопары с соответствующей изоляцией и защитой.

14. Используйте термопарную головку для защиты соединений.

15. Поддерживайте входное электрическое сопротивление измерительной цепи как можно более низким.

16. Оберегайте термопару, головку и удлинительные провода от грязи и влаги.

17. Не допускайте случайного заземления входной цепи.

18. Соблюдайте правильную полярность по все цепи.

19. Поддерживайте хорошие контакты по всей цепи.

20. Предупреждайте персонал об «электрически горячих» цепях.

21. Если необходимо использовать тонкие проводники, старайтесь максимально уменьшить их длину. При большом удалении термопары от вторичного преобразователя, следует использовать вблизи от термопары специальные модули, превращающие термо-ЭДС в сигнал тока или в цифровой отсчет.

22. Оберегайте по возможности датчик и провода от ударов и вибраций, которые могут ухудшить параметры системы.

23. Не подвергайте термопару резким колебаниям температуры и используйте ее и соединительные и компенсационные провода только в рабочем интервале температур.

24. По возможности ведите протоколирование результатов измерений.

3.6. Влияние реакторного облучения на характеристики термоэлектродов и материалов для термопреобразователей сопротивления

Термоэлектрическая нестабильность возникает также из-за влияния реакторного излучения на термопреобразователи. Вследствие важности влияния облучения на характеристики преобразователей этот материал выделен в отдельную главу (см. гл. 4).

Реакторное облучение является одним из эксплуатационных факторов, наиболее сильно влияющих на характеристики преобразователей. Оно может проявляться как в изменении характеристик термоэлектродной проволоки и обмотки термопреобразователей сопротивления (прямое воздействие), так и во влиянии облучения на сопротивление изоляции и на термоэлектрическую цепь (косвенное воздействие).

Изменение термоЭДС термоэлектродов и электрического сопротивления термопреобразователей сопротивления под воздействием облучения возникает вследствие следующих основных причин:

- превращения компонентов термоэлектродных сплавов и термопреобразователей сопротивления под воздействием радиоактивного облучения. Этот процесс называют *трансмутационным эффектом* или *радиационным легированием*, т.е. появление в термоэлектродном сплаве новых химических элементов;
- повреждения и накопления дефектов структуры сплавов, происходящие под воздействием облучения;
- нагрева чувствительного элемента — рабочего спая термопар и термосопротивления под воздействием нейтронов и поглощенных γ -квантов;
- возникновения фоновых токов в измерительных цепях вследствие захвата термоэлектродным материалом нейтронов и возникающего при этом β -распада, испускания γ -квантов и эмиссии электронов с высокой энергией, поглощения внешнего γ -излучения и возникновения комптоновской и фотоэлектронной эмиссии.

Нейтронное облучение влияет на механические свойства преобразователей температуры: происходит охрупчивание термоэлектродов и обмоток термопреобразователей сопротивления и их конструктивных элементов — защитных чехлов и др.

Возникающие при облучении изменения характеристик разделяют на мгновенные и интегральные. *Мгновенные* изменения (эффекты) возникают при наложении поля излучения на термопары. Эти эффекты зависят от интенсивности облучения и исчезают после

снятия поля. *Интегральные* изменения (эффекты) накапливаются со временем, они зависят от интенсивности облучения и не исчезают после прекращения облучения.

Мгновенные изменения являются следствием появления фоновых токов и нагрева чувствительного элемента. Некоторыми исследователями обнаруживались мгновенные эффекты, связанные, по их мнению, с влиянием реакторного облучения на уровни Ферми металлических термоэлектродов и, следовательно, на значение развиваемой термопарой термоЭДС. Согласно их данным при облучении хромель-алюмелевых термопар потоком тепловых нейтронов $3,3 \cdot 10^{14}$ н/(см² · с) при температуре плавления алюминия (660,3 °С) мгновенные изменения составили 26 °С. Они полностью исчезали после сброса радиационной нагрузки. В связи с тем, что такое изменение градуировки достигало больших значений, было предложено вводить весьма заметные поправки. Однако другими исследователями такие мгновенные эффекты при потоках нейтронов даже до 10^{16} н/(см² · с) не обнаружены.

Для разрешения этих противоречий были проведены совместные эксперименты представителями различных организаций, в том числе и «авторами» больших мгновенных эффектов, на исследовательском реакторе ИВВ-2М при потоках нейтронов, превышающих 10^{13} н/(см² · с), при температурах плавления алюминия и меди (соответственно 660,3 и 1084,6 °С) [47]. В этих экспериментах не были обнаружены заметные отклонения в показаниях термопар разнообразных конструкций. Небольшое обратимое повышение показаний термопар типов ХА и ВР вполне объясняется радиационным разогревом рабочего спая термопар.

Таким образом, можно считать, что причинами появления мгновенных эффектов являются радиационный разогрев рабочего спая термопары и фоновые токи, возникающие в полях излучений.

Изменения свойств термопар разделяют на обратимые и необратимые. К *необратимым* относят изменения, возникающие вследствие радиационного легирования и трансмутации и накопления радиационных дефектов, не ликвидируемые самоотжигом, т.е. интегральные эффекты. К *обратимым* относят мгновенные эффекты.

Изменения показаний термопар, расположенных в полях излучения, зависят от взаимного расположения температурного поля и полей нейтронного и γ -потоков. Это положение иллюстрируется рис. 3.16. Если поток излучений, а следовательно, и изменения свойств, вызванные этим потоком, приходятся на область постоян-

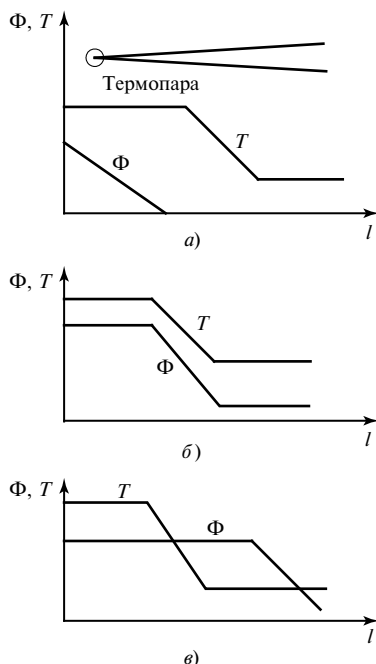


Рис. 3.16. Взаиморасположение нейтронного Φ и температурного T полей

ного температурного поля, изменения показаний термопар отсутствуют (рис. 3.16, а). Если изменения, вызываемые потоком излучения (рис. 3.16, б, в), приходятся на неизотермическую зону, возникают изменения в показаниях термопары. Они максимальны для случая, в котором интенсивность потока и вызванные им изменения в зоне неизотермического поля максимальны.

Влияние трансмутационного эффекта на состав термоэлектродов может быть оценено расчетным образом. Результаты расчета (табл. 3.19, 3.20) проведены для потока тепловых нейтронов 10^{14} н/(см² · с) и 20 лет облучения (флюенс $\sim 6 \cdot 10^{22}$ н/см²). Быстрые нейтроны при расчетах не учитывались, так как они оказывают небольшое влияние на ядерные превращения элементов. В таблицах в числителе — содержание элементов до облучения, в знаменателе — после облучения. На рис. 3.17 а, б, в приведены примеры изменения состава некоторых термоэлектродов. Из таблицы и рисунков видно, что облучение оказывает особенно сильное действие на термоэлектроды, содержащие вольфрам, медь и платину. Поэтому применение этих

Таблица 3.19

Влияние трансмутационного эффекта на состав термоэлектродов

Элемент	Состав термоэлектродных материалов, % масс.				
	хромель	алюмель	железо	медь	константан
Al	—	1,60/1,59	—	—	—
Si	0,36/0,36	0,74/0,75	—	—	0,05/0,05
Cr	9,53/9,43	—	—	—	—
Mn	—	3,35/2,21	0,00/0,22	—	0,96/0,63
Fe	—	0,02/0,16	100/99,87	—	0,20/0,53
Co	—	0,33/0,22	0,00/0,01	—	—
Ni	89,87/89,76	95,20/95,19	—	0,00/5,04	45,01/47,73
Cu	0,00/0,10	0,04/0,14	—	100/89,92	55,10/49,49
Zn	—	—	—	0,00/5,02	0,00/2,77

Таблица 3.20

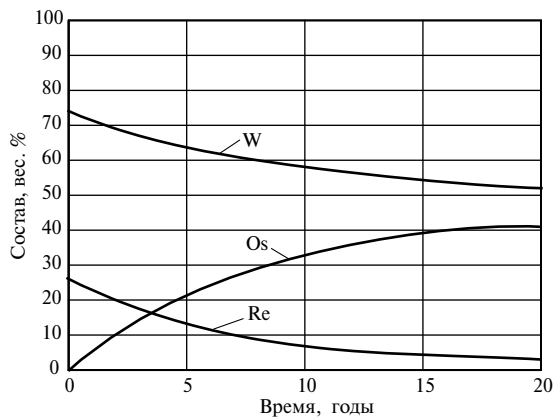
Влияние трансмутационного эффекта на состав термоэлектродов

Элемент	Состав термоэлектродных материалов, % масс.			
	платина	платинородий 10 % Rh	вольфрам	W + 26 %Re
Rh	—	10,0/0,12	—	—
Pd	—	0,00/0,98	—	—
W	—	—	100/81,02	74,00/59,95
Re	—	—	0,00/6,51	26,0/7,12
Os	—	—	0,00/12,37	0,00/32,93
Pt	100/98,15	90,00/88,33	—	—
Au	0,00/0,32	0,00/0,29	—	—
Hg	0,00/0,92	0,00/0,83	—	—

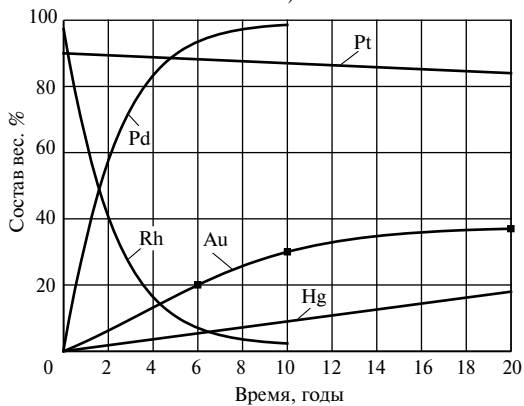
материалов в качестве термопар и термосопротивлений при сильном радиоактивном облучении неприемлемо. Наименее подверженными влиянию облучения являются никель и сплавы на никелевой основе, а также железо.

Экспериментальные результаты подтверждают эти выводы. Наибольшей стабильностью при потоках тепловых нейтронов от 10^{12} до 10^{14} н/(см²·с) и при флюенсе до 10^{22} н/см² обладает термопара

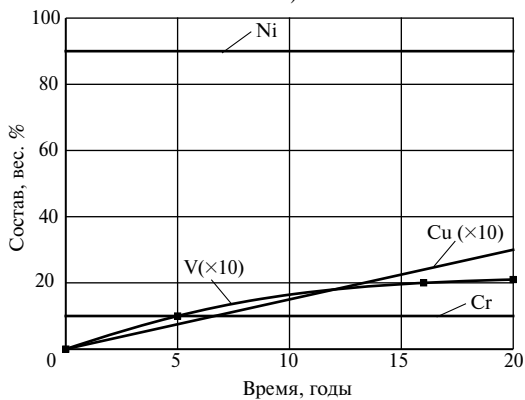
3.6. Влияние облучения на термоэлектроды и термопреобразователи



а)



б)



в)

Рис. 3.17. Изменение состава сплавов при облучении потоком нейтронов $10^{14} \text{ 1/см}^2 \cdot \text{с}$: а — сплав ВР26; б — сплав ПР10; в — сплав хромель

типа ХА. Изменение ее характеристик в этих условиях не превышает 1 % (замечание по поводу такого способа оценки изменений градуировки см. в п. 2.1.2). В тех же условиях изменение для термопар типов ПР10/0 и ПР13/0 достигает 10 %. Для термопар ВР5/20 изменение при флюенсах до 10^{21} н/см² составляет 2—5 %, при флюенсах до 10^{22} н/см² — 8—25 %. Использование этих термопреобразователей в таких условиях неприемлемо.

Можно ожидать удовлетворительную стабильность под воздействием облучения у термопары из нихросил-нисила. Создатели этой термоэлектродной пары рассчитывали получить преобразователь с лучшими, чем у термопары из хромель-алюмеля антирадиационными свойствами, и при этом иметь термоэлектрическую стабильность не хуже, чем у термопары из хромель-алюмеля.

К интегральным эффектам относятся изменения характеристик, связанные с накоплением радиационных дефектов при облучении [1].

Количество дефектов, образованных в объеме V за время $d\tau$ при воздействии потока излучения с плотностью Φ , равно $\Sigma\Phi V d\tau$, где Σ — сечение образования радиационных дефектов. Убыль радиационных дефектов в результате релаксационных процессов равна $(-\lambda NV d\tau)$, где λ — постоянная времени распада дефектов, зависящая от разности температур облучения и отжига дефектов. Уравнение баланса концентрации дефектов $N(\tau)$:

$$\frac{dN}{d\tau} = -\lambda N + \Sigma\Phi.$$

Решение этого уравнения при $N(\tau = 0) = 0$:

$$N(\tau) = \frac{\Sigma\Phi}{\lambda} [1 - \exp(-\lambda\tau)].$$

Для дефектов типа радиационного легирования и дефектов, температура отжига которых велика, $\lambda \rightarrow 0$ и

$$N(\tau) = \Sigma\Phi.$$

Для дефектов с невысокой температурой отжига [$\exp(-\lambda\tau) \ll 1$]:

$$N(\tau) = \Sigma\Phi/\lambda.$$

Как показали эксперименты, устойчивость накапливающихся радиационных дефектов зависит от энергии нейтронов. Так, при температуре 700 °С дефекты в термопарах типа ХА, облученных тепловыми нейтронами, практически полностью исчезают. Если материал облучается при температуре выше $\sim 0,6T_{\text{пл}}$ ($T_{\text{пл}}$ — температура плавления), происходит самоотжиг и структура материала восстанавлива-

ется. При меньших температурах и больших флюенсах нейтронов может идти накопление радиационных дефектов, изменяющее характеристики термодпар. В то же время, при облучении термодпар быстрыми нейтронами флюенсом 10^{22} н/см² и более восстановления свойств не происходит даже при проведении специального высоко-температурного отжига.

Порог чувствительности вольфрамрениевых преобразователей ВР5/20 к излучению достаточно низок и составляет всего по флюенсу $2 \cdot 10^{19}$ н/см².

Влияние облучения на показания термопреобразователей сопротивления, как и термоэлектрических преобразователей, связано с одинаковыми причинами: ядерные превращения и структурные изменения, разогрев чувствительного элемента в радиационных полях, возникновение фоновых токов. Особенно чувствительны к влиянию облучения платиновые термометры сопротивления, в которых платина перерождается в другие элементы. Так показания никелевых и платиновых термопреобразователей сопротивления при работе в активной зоне реактора при флюенсе $1 \cdot 10^{19}$ н/см² и температуре 100 °С были завышены соответственно на 2,6 и 3,7 °С. Их отжиг после испытаний не привел к восстановлению характеристик. По этим причинам никелевые и платиновые термопреобразователи сопротивления не применяются для измерения температуры в пространстве активной зоны.

Платиновые термопреобразователи сопротивления можно использовать при флюенсах нейтронов до 10^{19} н/см² при температуре до 400 °С.

Влиянию излучения подвергается также электрическая изоляция, применяемая в термопреобразователях. Наиболее распространенными для использования в радиационных условиях являются изоляции из оксидов магния MgO, алюминия Al₂O₃, бериллия BeO. Изоляцию из оксида алюминия подвергали испытаниям при температуре 500 °С в потоке быстрых нейтронов до $3 \cdot 10^{14}$ н/(см² · с), тепловых нейтронов до $3 \cdot 10^{14}$ н/(см² · с) и мощности дозы γ-излучения до $8 \cdot 10^5$ Р/с. Электрическая проводимость оксида алюминия при температуре 220 °С составила $5 \cdot 10^{-10}$ (Ом · см)⁻¹. Испытания изоляции из оксида магния проводились в потоке быстрых нейтронов $5,5 \cdot 10^{12}$ н/(см² · с), тепловых нейтронов $4 \cdot 10^{13}$ н/(см² · с) и мощности дозы γ-излучения 10^5 Р/с. При температуре 100 °С проводи-

мость оксида магния составила $1,2 \cdot 10^{-10}$ Ом \cdot см [1]. С повышением температуры проводимость оксидов алюминия и магния приближалась к проводимости необлученных образцов. Такая изоляция вполне достаточна для нормальной работы термоэлектрических преобразователей и термопреобразователей сопротивления. Хорошими электроизоляционными свойствами обладает оксид гафния HfO . Однако его применение в активной зоне ядерного реактора не желательно из-за большой поглощающей способности гафния. Такие изолирующие материалы, как слюда, лаки, цемент, винифлекс мало пригодны для использования в реакторных условиях из-за ограниченной радиационной и термической стойкости, плохих механических свойств и т.п.

В качестве изоляционного материала, особенно при изготовлении микротермопар, применяются органосиликатные материалы различных составов. Они сохраняют электроизоляционные свойства до 500°C при флюенсе нейтронов до $1,7 \cdot 10^{22}$ н/(см²).

Напомним, что влияние излучения проявляется и в сильном охрупчивании чехлов кабельных термопар и самих электродов при больших флюенсах нейтронов. Следствием этого, в частности, являются сложности с извлечением термопар из гильзы в активной зоне реакторов: нередки обрывы термопар. Этому способствует прикипание посадочного места термопреобразователя к соответствующему месту гильзы (см. п. 4.2.1).

Одной из причин появления мгновенного эффекта при облучении изоляции термопар в реакторе является возникновение объемного заряда в результате вылета электронов при β -распаде. При облучении интенсивным потоком тепловых нейтронов в изоляции, содержащей оксиды легкоактивируемых металлов, возникает объемный заряд. Появляющийся при этом ток компенсации заряда может протекать по проводящим элементам самого датчика и измерительных цепей. Такие токи, называемые фоновыми, могут возникнуть вследствие захвата нейтронов, сопровождающегося мгновенным испусканием γ -кванта и эмиссией из возбужденных ядер высокоэнергетических электронов, комптоновской и фотоэлектронной эмиссией. Эквивалентная электрическая схема измерения термоЭДС при возникновении фоновых токов представлена на рис. 3.18 для нескольких случаев заземления элементов измерительной схемы.

Анализ этих схем показывает [1], что наибольшее значение выходное напряжение на входе в измерительный прибор, обусловленное фоновыми токами, имеет место в схеме рис. 3.18, б, наимень-

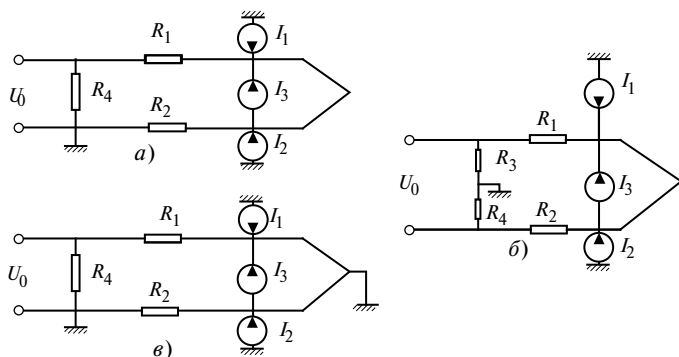


Рис. 3.18. Эквивалентная электрическая схема термоэлектрической цепи при наличии фоновых токов

шее — в схеме рис. 3.18, в. Если измерительная схема не заземлена ни в одной точке, фоновые токи будут создавать на электродах высокий потенциал, который может привести даже к пробое изоляции. Экспериментами подтверждено отсутствие влияния фоновых токов при заземлении рабочего спая термопары (см. рис. 3.18, в). Реальные фоновые токи составляли:

- для термопары типа ХА при потоке нейтронов 10^{15} н/(см² · с) и мощности дозы γ -излучения $3 \cdot 10^6$ Р/с — 0,1 мкА, наведенная этим током ЭДС для схем рис. 3.18, а и б — $10 \div 20$ мкВ ($0,25 \div 0,5$ °С);
- для термопары типа ВР 5/20 при потоке быстрых нейтронов $2 \cdot 10^{15}$ н/(см² · с) и мощности дозы γ -излучения $5 \cdot 10^6$ Р/с — до 2 мкА, наведенная этим током ЭДС для тех же случаев — 0,1 мВ (10 °С).

Отсюда следует, что рабочий спай термопары, применяемой для измерений в активной зоне ядерного реактора, должен быть заземлен. При сбросе радиационной нагрузки фоновые токи, вызванные облучением, исчезают, также как и наводимые ими ЭДС.

К мгновенным эффектам относят также изменение температуры термопреобразователей сопротивления и рабочего спая термопар вследствие их нейтронного и γ -разогрева. Температура нагрева, а следовательно, перегрев рабочего спая относительно температуры контролируемой среды зависит от интенсивности излучения, а также от теплообмена между рабочим спаем и внешней средой. Теплообмен определяется, в том числе, контактным термическим сопротивлением между рабочим спаем термопары и внешней средой, температура которой контролируется. В свою очередь контактное термическое сопротивление зависит от теплопроводности конструк-

ционных элементов, разделяющих рабочий спай термопары и окружающую среду, от термического контакта между чехлом термопары и посадочным местом гильзы, в которую вставляется термопара. Если термопара не села плотно в гильзу, появляется дополнительное термическое сопротивление, обусловленное зазором. Зазор может быть заполнен газом или отвакуумирован.

Эксперименты, проведенные на реакторе ВВЭР-440 Нововоронежской АЭС, показали, что перегрев рабочего спаия термопреобразователей в надзонном пространстве за счет γ -разогрева составляет 1,1—2,0 °С. при тепловой мощности реактора 3—4 % номинального значения [48]. Погрешность измерения температуры за счет радиационного разогрева составляет величину, поправка на которую должна быть учтена.

При неплотной установке термопреобразователя в гильзу погрешность измерения может превышать приведенные значения. Поэтому весьма важен контроль качества установки термопары в гильзу. Такой контроль осуществляется, например, путем разогрева рабочего спаия импульсом тока, получения кривой охлаждения и сравнения ее с полученной заранее эталонной кривой охлаждения при плотной посадке термопары в гильзу (см. п. 4.2.1).

Таким образом, в настоящее время можно считать установленным, что основными причинами появления мгновенных эффектов являются радиационный разогрев рабочего спаия термопары и фоновые токи, возникающие в полях излучений.

В работе [49] высказывается мнение, что основной вклад в появление необратимых изменений $\Delta_{\text{но}}$ градуировочной характеристики термопары ХА обусловлен изменением химического состава термоэлектродов под действием тепловых нейтронов. Значение $T_{\text{но}}(\text{К})$ рекомендуется подсчитывать по формуле

$$\Delta T_{\text{но}} = -8,469 \cdot 10^{-3} \Phi^{0,2258}.$$

Здесь Φ — флюенс тепловых нейтронов.

Таблица 3.21
Значения $\Delta T_{\text{но}}$ для различных значений флюенса Φ тепловых нейтронов

Параметр	Значение					
$\Phi \text{ см}^{-2}$	10^{16}	10^{17}	10^{18}	10^{19}	10^{20}	10^{21}
$\Delta T_{\text{но}}, \text{К}$	0,4	0,6	0,9	1,3	1,8	2,3

Эта формула получена при измерениях при температуре 200 °С, мощности дозы γ -излучения до $2 \cdot 10^6$ Р/с, плотности потока тепловых нейтронов до $3,5 \cdot 10^{15}$ см⁻² · с⁻¹, быстрых нейтронов — до $6 \cdot 10^{13}$ см⁻² · с⁻¹, флюенса тепловых нейтронов — до $6,8 \cdot 10^{21}$ см⁻² и быстрых нейтронов — до $8,5 \cdot 10^{20}$ см⁻². В табл. 3.21 приведены значения $\Delta T_{\text{но}}$ для различных значений флюенса тепловых нейтронов.

3.7. Надежность средств измерений температуры

Надежность СИ разделяют на метрологическую и механическую. *Метрологической* надежностью называется способность сохранять установленные значения метрологических характеристик в течение заданного времени при заданных режимах эксплуатации. К *механической надежности* следует относить способность устройства сохранять механические показатели: герметичность, плотность оболочек, защитных чехлов и т.п.

В соответствии с ГОСТ 27.002—89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» надежность трактуется как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонта, хранения и транспортирования. Как видно из определения, надежность является комплексным свойством, которое в зависимости от назначения объекта и условий его пребывания может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенное сочетание этих свойств.

Указанные важные свойства надежности характеризуют определенные технические состояния объекта. Различают пять основных видов технического состояния объектов.

Исправное состояние. Состояние объекта, при котором он соответствует всем требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неисправное состояние. Состояние объекта, при котором он не соответствует хотя бы одному из требований нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Работоспособное состояние. Состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Неработоспособное состояние. Состояние объекта, при котором значения хотя бы одного параметра, характеризующего способность выполнять заданные функции, не соответствует требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации.

Предельное состояние. Состояние объекта, при котором его дальнейшая эксплуатация недопустима или нецелесообразна, либо восстановление его работоспособного состояния невозможно или нецелесообразно.

Переход объекта (изделия) из одного технического состояния в другое обычно происходит вследствие **повреждений** или **отказов**. Совокупность фактических состояний объекта и возникающих событий, способствующих переходу в новое состояние, охватывает так называемый жизненный цикл объекта, который протекает во времени и имеет определенные закономерности, изучаемые в теории надежности.

В период функционирования объекта метрологические характеристики, под воздействием различных причин изменяются. Эти изменения могут приводить к отказам, т.е. к нарушению работоспособного состояния объекта. Принято разделять отказы на метрологические и прочие. Метрологическим отказом является выход метрологических характеристик за установленные пределы. Опыт показывает, что во многих условиях эксплуатации метрологические отказы возникают чаще, чем отказы механического характера (обрывы, замыкания и др.). Хотя механические отказы могут приводить к метрологическим отказам.

Метрологические отказы делятся на постепенные и внезапные. Постепенным является отказ, для которого характерно постепенное изменение одной или нескольких метрологических характеристик. Примером такого отказа является дрейф градуировки преобразователя температуры, происходящий вследствие старения чувствительного элемента и приводящий, в конце концов, к выходу за пределы, установленные техническими условиями или другим документом.

Внезапный отказ — это скачкообразное изменение одного или нескольких метрологических характеристик преобразователя температуры. Пример такого отказа — изменение градуировки термометра сопротивления вследствие замыкания витков чувствительного элемента между собой или их обрыв. В этом примере внезапный метрологический отказ является следствием механического отказа.

Вероятность наступления отказов элементов или преобразователя в простейшем случае подчиняется общей закономерности экспоненциального характера, параметрами которой являются интенсивность

потока отказа и время. Обычно интенсивность потока отказа — величина, не изменяющаяся во времени. В этом случае вероятность безотказной работы

$$P(\tau) = e^{-\lambda\tau},$$

где λ — интенсивность потока отказов, экспериментально определяемая величина; τ — время.

Тогда соответственно функция распределения отказов $f(\tau)$ и вероятность наступления отказа (ненадежность) $F(\tau)$ определяются соотношениями

$$f(\tau) = \lambda e^{-\lambda\tau},$$

$$F(\tau) = 1 - e^{-\lambda\tau}.$$

Прогнозирование внезапного отказа затруднительно, хотя последствия такого отказа обычно легко обнаруживаются. Например, внезапное изменение показаний преобразователя температуры при неизменном тепловом режиме работы оборудования можно с большой вероятностью трактовать, как следствие замыкания или обрыва в чувствительном элементе или в проводах связи.

С метрологическим отказом связано понятие метрологической исправности, под которой понимается такое состояние, при котором все нормируемые метрологические характеристики соответствуют установленным требованиям. Определение и перечень метрологических и прочих отказов обычно оговаривается в технических условиях на конкретное СИ.

Определение интенсивности потока любых отказов — трудоемкое испытание, требующее значительного времени. Время испытания должно быть не меньше установленного срока службы, если не проводятся ускоренные, форсированные испытания. Количество испытуемых изделий должно быть статистически значимо. Обычно это несколько десятков.

Интенсивности потока отказов элементов изделия и самого изделия — в достаточной степени индивидуальны. Однако ряд простейших элементов различных изделий имеют схожие интенсивности, что позволяет упростить процедуру испытаний на надежность. Данные по интенсивности отказов некоторых элементов преобразователей температуры приведены в табл. 3.22 [50].

Для того чтобы определить параметры метрологического отказа, необходимы наблюдения за метрологическими характеристиками в течение длительного времени. На основании этих наблюдений должна быть получена математическая модель функционирования

Таблица 3.22

Интенсивность отказов некоторых элементов преобразователей температуры, $10^{-6}, \text{ч}^{-1}$

Элементы преобразователей	Интенсивность отказов, минимальная, максимальная, средняя
Рабочий спай	0,16—1,02/0,51
Термоэлектрод	0,007—0,02/0,013
Изолятор чувствительного элемента	0,03—0,08/0,05
Изолятор выводных проводников*	0,005—0,11/0,05
Места пайки	0,003—0,05/0,026
Штуцер	0,0001—0,001/0,003
Гильза	0,0022—0,009/0,006
Металлические рукава и шланги	0,1—3,5/2,4
Замазки и засыпки	0,05—0,33/0,08
Неметаллические прокладки	0,01—0,03/0,02

*Значения даны на каждые 10 м проводника.

СИ — математическая зависимость градуировочной характеристики от времени эксплуатации, уровня температур и интенсивности других влияющих параметров (облучение, механические нагрузки и пр.).

Существует несколько показателей надежности. Применительно к метрологии нашли применение следующие показатели:

1. Вероятность безотказной работы $P(\tau)$ — вероятность того, что за время τ нормированные метрологические характеристики не выйдут за установленные пределы.

2. Нарботка до отказа — продолжительность работы (наработка) от начала эксплуатации до первого отказа.

3. Средняя наработка на отказ — этот показатель относится к восстанавливаемым объектам, при эксплуатации которых допускаются многократно повторяющиеся отказы. Эксплуатация таких объектов может быть описана следующим образом: в начальный момент времени объект начинает работу и продолжает работу до первого отказа; после отказа происходит восстановление работоспособности, и объект вновь работает до отказа и т.д. На оси времени моменты отказов образуют поток отказов, а моменты восстановлений — поток восстановлений.

Средняя наработка на отказ объекта (наработка на отказ) определяется как отношение суммарной наработки восстанавливаемого объекта к числу отказов, происшедших за суммарную наработку.

4. Гамма-процентная наработка до отказа τ_γ — наработка, в течение которой отказ не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах, она определяется из выражения

$$P(\tau_\gamma) = 1 - F(\tau_\gamma) = 1 - \int_0^{\tau_\gamma} p(\tau) d\tau = \frac{\gamma}{100}.$$

5. Частота (интенсивность) отказов $\omega(\tau)$ — условная плотность вероятности восстановления невосстанавливаемого СИ, которая находится для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого момента отказ не возник:

$$\omega(\tau) = -\frac{1}{p(\tau)} \frac{dp(\tau)}{d\tau} = \frac{p_n(\tau)}{P(\tau)} = \frac{p(\tau)}{\int_1^\infty p(\tau) d\tau}.$$

Важными показателями долговечности являются срок службы и ресурс. Срок службы равен календарной продолжительности эксплуатации изделия от ее начала до наступления предельного состояния. Ресурс — суммарная продолжительность наработки изделия, при достижении которой эксплуатация должна быть прекращена независимо от его состояния. Так как эти показатели — величины статистические, различают средние и гамма-процентные сроки службы и ресурсы. Их определение аналогично приведенным выше определениям.

Термопары и термометры сопротивления целесообразно относить к невосстанавливаемым изделиям, так как метрологические характеристики невозможно исправить. Можно восстановить лишь целостность чехла, или контактов в клеммной головке.

Для невосстанавливаемого объекта ресурс представляет собой среднюю продолжительность работы до отказа или до наступления предельного состояния. Практически эта величина совпадает со средней наработкой до отказа $T_{\text{ср}}$.

Одной из основных форм удостоверения в том, что СИ находится в метрологически исправном состоянии, является его периодическая поверка или калибровка. Они проводятся через оптимально выбранные промежутки времени, называемые межповерочными интервалами. Величина МПИ должна быть не слишком малой, так как это

увеличивает материальные и трудовые затраты, и может, если СИ извлекается из места монтажа, привести к его поломкам. Она не должна быть слишком велика, так как при этом возрастает вероятность того, что в эксплуатации будет находиться неисправное изделие.

В работе [50] приведены результаты наблюдения за изменением средней наработки на отказ термопреобразователей на Калининской АЭС (табл. 3.23). Результаты относятся ко всем преобразователям, эксплуатировавшимся на АЭС.

Средняя наработка на отказ определялась по формуле

$$T_{\text{ср}} = \frac{\gamma \tau}{n},$$

где γ — количество эксплуатируемых преобразователей; τ — время наработки, ч; n — число отказов.

В работе [50] отмечается, что полученные при эксплуатации показатели средней наработки на отказ более чем на порядок выше показателей, установленных для различных преобразователей. Близкие результаты были получены для преобразователей, эксплуатировавшихся на Балаковской АЭС. К сожалению, в цитируемом источнике не указывается, что принято за отказ.

В табл. 3.24, 3.25 приведены сведения о надежности (наработки на отказ) термоэлектрических преобразователей (ТП) и платиновых термопреобразователей сопротивления (ТС), функционирующих в «условиях атомной энергетики». Данные получены при эксплуатации преобразователей температуры, произведенных в СКБ «Электротермометрия», г. Львов, ранее 1985 г.

Отказы по признакам распределены следующим образом: обрыв элемента или цепи чувствительного элемента — 41 %, выход погрешности или ее составляющей за допустимые пределы — 57 %, раз-

Таблица 3.23
Динамика изменений средней наработки на отказ термоэлектрических преобразователей (ТП) и термопреобразователей сопротивления (ТС) на Калининской АЭС

Показатель		Год				Итого
		1995	1996	1997	1998	
Количество преобразователей, шт.	ТП	317	14	159	100	590
	ТС	828	199	281	167	1475
Средняя наработка на отказ, тыс. ч	ТП	570,3	285,9	633,6	1901	951,1
	ТС	458,8	443,6	538,6	424,4	467,7

3.7. Надежность средств измерений температуры

Таблица 3.24

**Средняя наработка на отказ термоэлектрических преобразователей
и термопреобразователей сопротивления**

Показатель		Год				Итого
		1995	1996	1997	1998	
Количество, шт.	ТП	317	14	159	100	1442
	ТС	828	199	281	167	1475
Средняя наработка на отказ, тыс. ч	ТП	570,3	285,9	633,6	1901	951,1
	ТС	458,8	443,6	538,6	424,4	467,7

Таблица 3.25

**Интенсивность отказов термоэлектрических преобразователей
и термопреобразователей сопротивления**

Тип прибора	Интен-сивность отказов, $\lambda \cdot 10^{-6}$, ч	Плотность вероятности	Воздействующий фактор			
			Измеряе-мая темпе-ратура, °C	Характер среды	Вибрация	
					Ампли-туда, мм	Частота, Гц
ТП	5,28	$P(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$	400	Газообразная, жидкая металлическая поверхность	Менее 10	50—60
ТС	4,36	$P(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$	Менее 400			

рушение защитной арматуры — 1,5 %, прочие (нарушение контактов, окисление и др.) — 0,5 %.

Отказы по причине их возникновения распределены следующим образом: конструкционные — 10—15 %, производственно-технологические — 30 ÷ 40 %, эксплуатационные — 45 ÷ 50 %.

Отклонение метрологических характеристик от исходных наблюдается при эксплуатации в нормальных условиях, соответствующих требованиям ТЗ и ТУ, при параметрах, близких к предельно допустимым. Разрушение арматуры и нарушение работоспособности преобразователей происходит при предельных температурах, давлениях (до 100 кгс/см²), вибрациях, скоростных потоках, воздействии радиации. Временной интервал, которому соответствуют приведенные в таблице значения, не указан.

Единичные отказы в работе преобразователей температуры вызываются часто случайными причинами, которые на практике выявляются в начальный период их эксплуатации. Оказалось, что весьма действенным приемом их выявления перед установкой на штатное место является технологическое испытание в ходе которого преобразователи подвергаются непродолжительному воздействию, максимально приближенному к натурному. При таком испытании в течение 100 ч выявляют случайные отказы.

3.8. Диагностирование работоспособности преобразователей температуры

Из предыдущего изложения видно, что в процессе эксплуатации может возникнуть множество причин, которые приводят к недостоверным показаниям преобразователей температуры. Эти причины связаны как с влиянием условий эксплуатации на свойства и параметры термоэлектрических цепей и термосопротивлений, так и с возникновением несоответствия между температурами чувствительного элемента преобразователя и контролируемой точки (узла) оборудования, например, из-за оттока тепла по электродам преобразователя. Поэтому, в ответственных случаях полагаться только на непосредственные измерения температуры не всегда практично. Трудности, связанные с изменением метрологических характеристик при эксплуатации, преодолеваются путем поверки или калибровки преобразователей температуры.

Однако в действительности эта процедура далеко не всегда может быть реализована. Так, этот подход по понятным причинам не может быть использован на будущей длительно работающей невозвращаемой космической установке. Затруднен этот подход для преобразователей температуры, расположенных в активной зоне ядерных энергоустановок. В тех случаях, когда есть возможность извлечения преобразователей температуры для проведения поверочных или калибровочных исследований, это делать зачастую сложно, дорого и не оперативно. Не всегда удастся извлекать преобразователь целым. Кроме того, следует помнить, что поверка или калибровка имеет смысл лишь тогда, когда температурное поле вдоль термоэлектрического преобразователя при эксплуатации соответствует температурному полю при поверке (калибровке).

В связи с этим диагностирование работоспособности преобразователей температуры является актуальной задачей, которая должна привлекать внимание разработчиков термометрической аппаратуры.

Диагностические процедуры могут быть направлены на решение двух типов задач:

- определение технического состояния преобразователей температуры, признаков, свидетельствующих о приближении нарушений в функционировании преобразователей;
- оперативное определение реальных метрологических характеристик преобразователей, что, по сути, не что иное, как проверка или калибровка преобразователя без их демонтажа из места установки.

Диагностические методы могут быть разделены на четыре основных класса.

Рассмотрим эти классы и методы более подробно на примерах.

Класс 1. Примером являются методы, связанные с установлением попарных регрессионных связей между показаниями преобразователей и выбраковкой неработоспособных экземпляров, с исследованием отклика групп преобразователей на незначительные специально вызванные изменения температурного поля установки и т.п.

Статистические методы являются одними из наиболее перспективных, хотя они пока не нашли широкого распространения. В Физико-энергетическом институте независимо развивались два метода, основанных на статистическом подходе. Один из них рассмотрен в п. 5.3.4. В другом методе [51] предложен тестовый способ оперативного выявления отказавших измерительных каналов в системе внутриреакторного температурного контроля с определением погрешности отказавшего канала и восстановлением информации при систематическом характере возникающей погрешности. Метод был реализован на одном из экспериментальных реакторов и заключается в следующем. Органами управления создается серия тестовых режимов незначительных посекторных деформаций полей энерговыделений при сохранении расхода и мощности установки. При этом в каждом режиме информационного канала измеряют температуру поверяемой системы. Последующей статистической обработкой результатов измерений получают некую консервативную функцию температуры, обладающую свойством информационной избыточности по температуре, что и позволяет отбраковывать каналы, содержащие недостоверную информацию.

Класс 2. К нему относят методы, включающие периодические или постоянные измерения различных параметров цепи термoeлектронов, избыточные измерения температуры и т.п.

К параметрам цепей различных термопреобразователей, характеризующим их состояние, можно отнести:

- электрическое сопротивление термоэлектрической цепи. Его изменение может свидетельствовать о закорачивании цепи и появлении ложных спаев, о нарушениях в переходных контактах, ведущих к проблемам в работе вторичных преобразователей;
- сопротивление электрической изоляции, которое может вызвать недопустимое шунтирование термоэлектродов или цепей термопреобразователей сопротивления;
- измерение электрической емкости между термоэлектродами и металлическим чехлом, свидетельствующее о целостности термоэлектрической цепи и уровне сопротивления изоляции;
- измерение шума сигнала, его появление может свидетельствовать о прогрессирующих нарушениях в целостности электрической цепи и пр.;
- измерение постоянной времени измерительной цепи полезно для контроля ее состояния;
- измерение времени прохождения прямого и отраженного импульса тока (рефлектометрический метод) полезно для выявления ложных спаев и обрывов и их места в цепи;
- избыточные измерения температуры в одной точке несколькими преобразователями или многоэлектродными термопарами;
- измерения температуры в соседних участках преобразователя;
- измерение постоянной остывания термопары при разогреве импульсом тока.

Отдельные процедуры из приведенных выше или их комбинации, безусловно, могут быть полезны для диагностики технического состояния преобразователей температуры. Имеются сообщения о том, что в одном из быстрых зарубежных натриевых реакторов велись регулярные измерения сопротивления изоляции и измерительной цепи термопар.

В реакторных установках «Бук» и «Топаз» использовались четырехэлектродные (сдвоенные) термопары (см. п. 4.2.6). К этому же классу относится контроль скорости измерения показаний преобразователя температуры. Если эта скорость превышает скорость, определяемую тепловой инерцией контролируемого узла, можно подозревать отказ преобразователя.

К этому классу относится метод закорачивания термопары в области холодных спаев. В этом случае вторичный преобразователь должен показать температуру холодных спаев. Если это не наблюда-

ется, имеются проблемы с остальной измерительной цепью термоэлектрического преобразователя.

Класс 3. К нему относят методы, связанные с введением в конструкцию преобразователя специальных калибровочных устройств, с сочетанием в одном корпусе нескольких датчиков различных типов и т.п.

К этому классу относится метод, при котором используются встроенные калибраторы [52] на основе плавящихся металлов, образующих реперную точку. Метод кажется почти безупречным в метрологическом отношении. Однако создание термометрических устройств более, чем с одним металлом — реперной точкой, технически сложно. Также пока не известны методы экстраполяции результата калибровки при одной температуре на рабочий диапазон значений температуры. Кроме того, нужно быть уверенным в том, что за время пребывания реперного металла под облучением не произойдет его радиационного легирования и соответствующего изменения температуры плавления. Метод распространен при исследованиях влияния облучения на характеристики термопар.

Представляется перспективной установка в ответственных местах одновременно двух преобразователей температуры различных типов, например, термоэлектрического и термопреобразователя сопротивления. Это может повысить надежность измерения температуры [53].

Класс 4. К нему относят методы, основанные на установлении специального режима, например, изотермического по всему тракту теплоносителя.

Одним из распространенных отказов термоэлектрических преобразователей, в основном относящимся к преобразователям кабельного типа, является разгерметизация оболочки. Ее причинами могут быть влияние внешней среды и наличие влаги внутри кабеля. В последнем случае может происходить продольный разрыв оболочки кабеля протяженностью несколько миллиметров, сопровождающийся иногда обрывом термоэлектродов. Фиксация такого отказа обычно не вызывает затруднений.

Труднее идентифицировать разгерметизацию оболочки термопарного кабеля, находящегося в жидкометаллическом теплоносителе. В этом случае наиболее вероятным местом разгерметизации является зона сварного шва в области совместного рабочего спая, так как он образован сплавлением разнородных сплавов. Попадающий при этом внутрь кабеля расплавленный металл пережигает термоэлектроды, образуя ложный спай. С течением времени (обычно, десятки

часов) ложный спай перемещается внутри кабеля, несмотря на довольно плотную засыпку изоляции внутри кабеля, от рабочего спая к головке преобразователя. Пока это перемещение происходит в пределах изотермической зоны, разгерметизация проявляется только как уменьшение электросопротивления термоэлектродов. После выхода из изотермической зоны такой преобразователь генерирует сигнал, соответствующий температуре ложного спая. Поэтому важно своевременно выявить факт разгерметизации преобразователя. Для обнаружения разгерметизации можно использовать четырех- или трехэлектродную термопару [54]. Схема такой термопары приведена на рис. 3.19. Если электроды 8 и 9, а также электроды 10 и 11 соответственно идентичны друг другу, при переключении одновременно

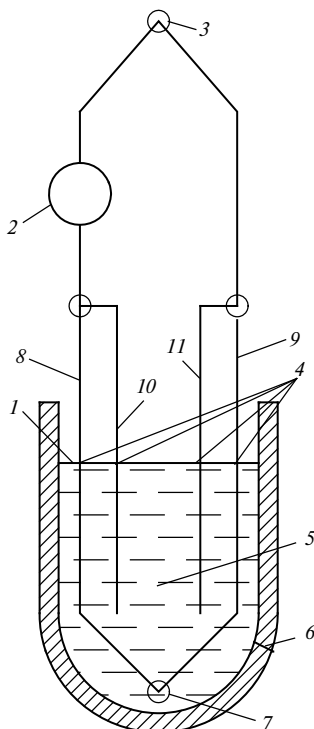


Рис. 3.19. Четырехэлектродная дефектная термопара для измерения температуры жидкого металла:

1 — уровень металла внутри чехла; 2 — измерительный прибор; 3 — холодный спай термопары; 4 — ложные спай; 5 — жидкий металл; 6 — дефект; 7 — рабочий спай термопары; 8—11 — электроды

3.8. Диагностирование работоспособности преобразователей температуры

основных и дополнительных электродов результирующая ЭДС будет равна нулю, что и служит сигналом о разгерметизации оболочки кабеля. Если используется трехэлектродная схема, при переключении не происходит полной компенсации термоЭДС основной пары, она изменяется скачком, что также служит сигналом о разгерметизации.

В п. 4.2.1 был упомянут метод диагностирования положения термопреобразователя в гнезде температурного канала реактора ВВЭР, заключающийся в подаче импульса электрического тока в цепь термопары ее нагрева и изучении отклика этой термопары. На рис. 3.20, 3.21 приведены схемы преобразователей температуры в гильзе реактора ВВЭР.

Импульсный нагрев термопары электрическим током может быть осуществлен установкой (рис. 3.22), с помощью которой проводились измерения на втором блоке Ровенской АЭС [55]. Нагрев термоэлектродов осуществлялся импульсами тока, формируемыми источником питания и блоком управления. В качестве источников питания

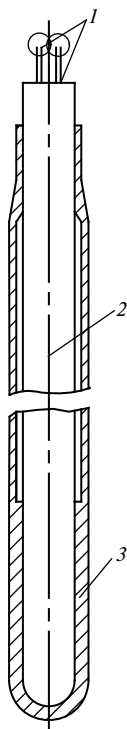


Рис. 3.20. Схема термоэлектрического преобразователя в надзонном пространстве реактора ВВЭР:

1 — термоэлектроды; 2 — кабельный термоэлектрический преобразователь; 3 — гильза выноски без стрелок

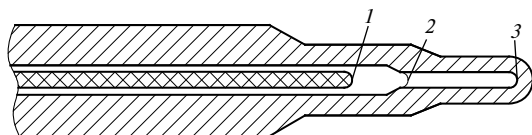


Рис. 3.21. Схема расположения преобразователя температуры в гильзе реактора ВВЭР:

1 — преобразователь в положении «недосыл»; 2 — положение на входе в посадочное гнездо; 3 — положение «точно»

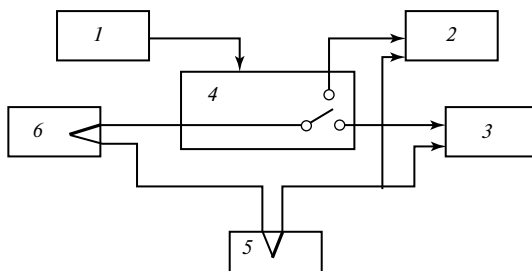


Рис. 3.22. Функциональная блок-схема установки для нагрева термопар:
 1 — блок управления; 2 — источник питания; 3 — регистратор сигналов термопары;
 4 — коммутатор цепей; 5 — блок компенсации; 6 — термопара

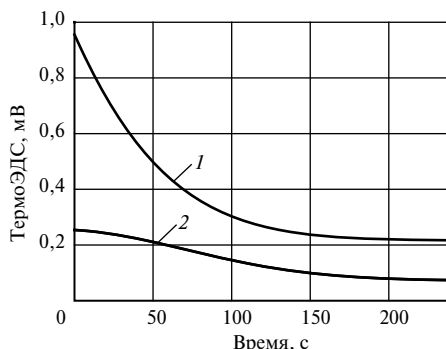


Рис. 3.23. Показания термопар с наконечниками при разной степени досыла в гнездо:
 1 — посадка с недосылом; 2 — штатная посадка

использовались разделительный и регулировочный трансформаторы. Регистрация сигнала после отключения токового импульса осуществлялась потенциометром типа КСП-4 класса 0,25 с резисторным делителем сигнала на входе. Для преобразователей типа ТХА-2076, имеющих сопротивление 120—130 Ом, устанавливаемых в наконечник диаметром 9 мм, экспериментально подобранная длительность импульса составила 120 с при напряжении около 220 В. Показания термопар при остывании разогретого спая приведены на рис. 3.23.

Описанная методика полезна для контроля качества теплового контакта термоэлектрического преобразователя с поверхностями других видов оборудования.

Различные методы диагностики дефектов термоэлектрических цепей сведены в табл. 3.26.

3.8. Диагностирование работоспособности преобразователей температуры

Таблица 3.26

Дефекты термоэлектрических цепей и методы их диагностики

Природа, характер дефекта	Диагностический признак	Методы обнаружения	Примечания
Измерения электрических величин			
Нарушение целостности измерительной цепи: короткое замыкание, разрыв, шунтирование, утечка	Изменение сопротивления измерительной цепи	Измерение сопротивления измерительной цепи	Измерения полезно проводить непрерывно: скачкообразное изменение показаний указывает на наличие дефекта
	Остаточное напряжение	Измерение постоянной времени цепи	—
	Отражение импульса от дефекта	Метод импульсной рефлектометрии	Целесообразно проводить периодические измерения, метод указывает характер и местоположение повреждения
Нарушение сопротивления изоляции	Изменение сопротивления изоляции	Измерение сопротивления изоляции	—
Нарушение целостности спая, нарушение целостности измерительной цепи, нарушение целостности изоляции	Появление шумов, бросков тока и т.п.	Измерение шумового потенциала	—
Отход от места измерения (накопление термической массы)	Уменьшение (увеличение времени отклика)	Измерение переходной характеристики спая	—
Температурные измерения			
Дефекты различной природы	Расхождение, несоответствие показаний	Статистические методы, использование встроенного калибровочного устройства или сочетание датчиков разного типа, установка специального режима	Указание на наличие дефекта, основание для выбраковки показаний данного термопреобразователя

Окончание табл. 3.26

Природа, характер дефекта	Диагностический признак	Методы обнаружения	Примечания
Дефекты различной природы, в том числе раскалибровка одного из электродов	Расхождение результатов измерений	Избыточные измерения температуры, применение разветвленных цепей	Указание на наличие дефекта
	Расхождение результатов измерений	Измерение температуры смежных участков	—
	Расхождение результатов измерений	Измерение разности температур	—

Контрольные вопросы

1. Что такое погрешность измерений?
2. Перечислите основные источники погрешности измерений температуры.
3. Охарактеризуйте методическую и инструментальную погрешности средств измерений температуры.
4. Дайте понятие о термоэлектрической неоднородности (ТЭН) термоэлектродных материалов и опишите влияние ТЭН на погрешность измерений температуры.
5. Поясните методы обнаружения ТЭН.
6. Каковы особенности влияния реакторного облучения на погрешность измерений с помощью термоэлектрических преобразователей и преобразователей термосопротивления?
7. Приведите методы оценки погрешностей измерений температуры.
8. Каковы основные положения понятия о неопределенности измерений температуры?
9. Что такое надежность средств измерений температуры?
10. Охарактеризуйте особенности поверки (калибровки) средств измерений температуры на реакторных установках.
11. Перечислите методы диагностирования средств измерений температуры.
12. Перечислите основные правила, соблюдение которых повышает точность измерений температуры.

Глава четвертая

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ НА РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ

4.1. Измерение температуры узлов реакторных установок

В этой главе описаны системы контроля температуры на некоторых отечественных и зарубежных реакторных установках. Описываемые системы входят в подсистемы, входящие в свою очередь в состав автоматизированных систем управления технологическим процессом на энергоблоках атомных электростанций (АСУ ТП ЭБ АЭС). Эти подсистемы могут носить различные названия для различных типов реакторов. Например, для реакторов типа ВВЭР-440 эта подсистема носит название «Система внутриреакторного контроля (СВРК)». В блоках реакторов ВВЭР-1000 (экспортного исполнения) СВРК входит в Систему контроля, управления и диагностики (СКУД). Кроме внутризонных измерений температуры в рамках этих систем выполняются измерения температур теплоносителя в петлях первого и второго контуров реактора и другого оборудования. В этом случае кроме преобразователей термоэлектрического типа используются платиновые термопреобразователи сопротивления.

Сигналы термопреобразователей используются в управляющих системах безопасности и в системах, обеспечивающих контроль и управление в режиме нормальной эксплуатации. С их помощью формируются команды на срабатывание аварийной защиты реактора, предупредительных защит, блокировок и сигнализаций. Эти сигналы задействованы в системах регулирования.

4.1.1. Измерение температуры теплоносителей

В настоящее время в основном эксплуатируются ядерные энергетические установки с водяным охлаждением активной зоны реактора. Их особенностью, отражающейся на конструкции СИ температуры, являются высокое давление воды до 100 кг/см^2 , температура воды до 300°C и пара до 510°C . Вода как теплоноситель отличается от других теплоносителей высокой коррозионной активностью. Это определяет выбор материалов защитной арматуры преобразователей температуры и ее размеры.

Реакторы на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями являются основой атомной энергетики в будущем [56]. В настоящее время на Белоярской АЭС работает единственный в мире энергетический блок с реактором на быстрых нейтронах БН-600. Реактор охлаждается натриевым теплоносителем. Особенностью натриевого теплоносителя являются низкие температура плавления (примерно 98 °С), давление в натриевых контурах (до 10 кг/см²) и достаточно высокая температура натрия — 550 °С на выходе из активной зоны.

Свинцово-висмутовый (сплав свинца и висмута эвтектического состава) теплоноситель характеризуется более высокой коррозией и эрозией, чем у натрия, и большим давлением, чем у натрия, из-за большей плотности. Он имеет сравнительно невысокую температуру плавления (125 °С), практически не взаимодействует с водой. Вместе с тем он требует поддержания специального довольно сложного химического режима для уменьшения высокой коррозионной активности. В атомных паропроизводительных установках одного из типов советских подводных лодок в качестве теплоносителя использовался этот сплав свинца. В последнее время значительное внимание уделяется свинцовому теплоносителю.

Для ядерных энергетических установок большой мощности космического назначения перспективным теплоносителем является расплавленный литий (изотоп литий-7). Он имеет прекрасные теплофизические свойства, малую активизируемость в активной зоне, у изотопа литий-7 малое сечение поглощения. Однако он отличается повышенной по сравнению с натрием коррозией конструкционных материалов, требует при высоких температурах (до 1000 °С) применения в качестве конструкционного материала тугоплавких металлов (ниобий, ванадий) и их сплавов. Его температура плавления достаточно высока (примерно 180 °С).

Натрий-калиевый сплав эвтектического состава использовался в качестве теплоносителя космических ядерных энергетических установок небольшой мощности, созданных в СССР. Сплав имеет низкую температуру плавления — -11 °С. Натрий-калиевый сплав использовался также во вспомогательных контурах охлаждения оборудования быстрого реактора с натриевым охлаждением БН-350 (Казахстан), в настоящее время выведенного из эксплуатации.

Металлический цезий используется в виде пара в термоэмиссионном преобразователе тепловой энергии в электрическую в реакторах космического назначения.

В качестве теплоносителя быстрых реакторов рассматривается гелий, имеющий хорошие ядерно-физические и теплофизические характеристики. Но он требует большого давления в контуре охлаждения — до 300 кг/см^2 .

Ранее на одном из английских реакторов в качестве теплоносителя использовался диоксид углерода CO_2 . Однако этот теплоноситель не нашел дальнейшего применения из-за взаимодействия оксида углерода с графитовым замедлителем.

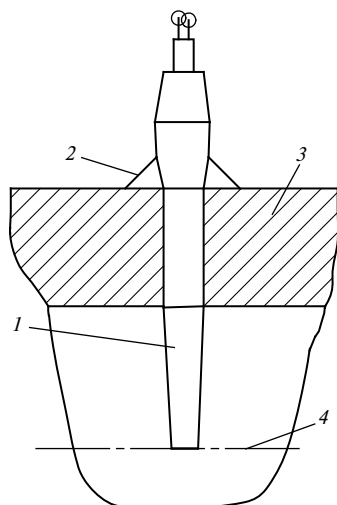
Рассматриваются также реакторы, охлаждаемые расплавленной смесью различных солей, в том числе смесью фтористых солей лития и бериллия (флайб).

В качестве теплоносителя термоядерных установок типа «ТОКА-МАК» рассматриваются литий, эвтектический сплав лития со свинцом и др.

Конструкции устройств для измерения температуры теплоносителя зависят от типа реакторной установки, от места размещения устройства по тракту теплоносителя. Так, для измерения температуры воды в активной зоне на выходе из кассет реактора ВВЭР применяются термопреобразователи, расположенные внутри герметичных трубок (см. п. 4.2.1).

Для измерения температуры в трубопроводах вне активной зоны реактора применяются конструкции, пример которых приведен на рис. 4.1 [1]. Подобные конструкции используются на многих реакторных установках отечественного производства. Такие конструкции могут иметь три преобразователя. Сигнал считается достоверным, если два преобразователя дают одинаковые показания. Консольная конструкция гильзы имеет недостаток, связанный с ее возможной вибрацией и, вследствие этого, с поломкой. Именно такой случай произошел на японском реакторе «Монжю» с натриевым теплоносителем, приведший к течи большого количества теплоносителя. Бóльшей устойчивостью обладает конструкция, представленная на рис. 4.2. В ней термопара образована двумя термоэлектродами, сваренными встык. Каждый термоэлектрод выведен в свою сторону. Эта конструкция имеет меньшую тепловую инерцию, хорошую жесткость и стойкость при тепловых ударах.

Для измерения температуры перегретого пара на Белоярской АЭС использовалась конструкция, представленная на рис. 4.3. Различные конструкции преобразователей представлены в монографии [1].



↑

Рис. 4.1. Схема расположения термопреобразователя в трубопроводе:

1 — термопреобразователь; 2 — сварной шов; 3 — стенка трубопровода; 4 — осевая линия трубопровода

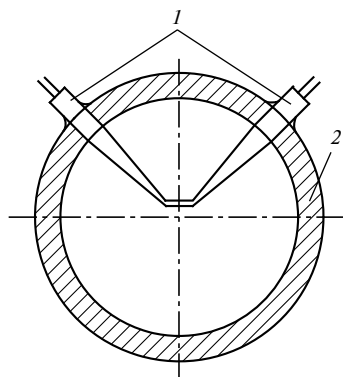


Рис. 4.2. Термопреобразователь с дугообразной гильзой:

1 — термопреобразователи; 2 — трубопровод

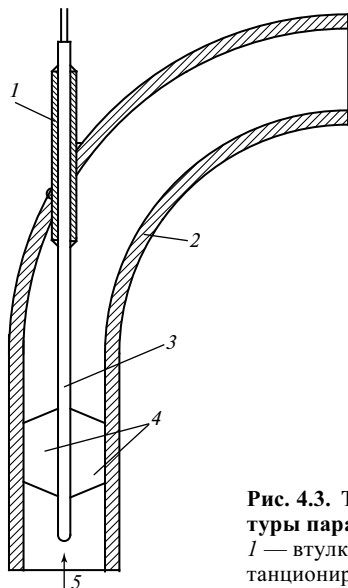


Рис. 4.3. Термопреобразователь для измерения температуры пара:

1 — втулка; 2 — труба; 3 — термопреобразователь; 4 — дистанционирующие элементы; 5 — вход пара

На всех жидких металлах возможно создание преобразователя температуры «жидкий металл — конструкционный материал», отличающегося высоким быстродействием (см. п. 2.2.1).

4.1.2. Измерение температуры тепловыделяющих элементов

Тепловыделяющий элемент является узлом реакторной установки, наиболее напряженным в тепловом и радиационном отношении, содержащим дегазирующийся материал. На всех этапах создания реактора и его эксплуатации принимаются все возможные меры по предотвращению превышения температуры топлива твэл и его оболочки сверх допустимого значения. Поэтому было бы логично осуществлять защиту активной зоны реактора по сигналу преобразователя, измеряющего температуру твэл. Однако технически это трудно сделать по следующим причинам:

- сложно выводить сигнал такого преобразователя, учитывая, что каждый твэл индивидуально или в составе сборки периодически выгружается и заменяется на новый;
- при наличии большого количества твэл в активной зоне сложно выбрать наиболее «представительный» твэл. Поэтому измерения температуры поверхности и топлива твэл осуществляются лишь на экспериментальных стендах или в экспериментальных сборках твэл на реакторах.

Измерение температуры каждой детали твэл — сложные техническая и метрологическая задачи. Сложность измерения температуры оболочки твэл обусловлена тем, что она имеет тонкую стенку. Разработаны три способа размещения преобразователей для измерения температуры поверхности оболочки твэл [1]:

- заделка в дистанционирующие ребра оболочки;
- крепление на поверхности без углубления в оболочку;
- заделка с углублением в оболочку.

На рис. 4.4 показана заделка термопреобразователя на поверхность твэл, на рис. 4.5 — в дистанционирующее ребро. Целесообразно, чтобы применяемые термопреобразователи имели внешний диаметр защитного чехла не больше толщины оболочки. В каждом из этих случаев в той или иной степени происходит искажение температурного поля стенки твэл. Поэтому необходимы анализ степени искажения и оценка возникающей при этом погрешности измерения температуры.

Приведенные способы установки преобразователей температуры применялись как на экспериментальных моделях твэл, так и на реальных твэл в активных зонах ядерных реакторов.

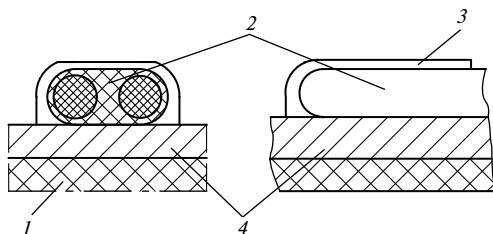


Рис. 4.4. Схема крепления преобразователя на поверхности твэл:

1 — топливо; 2 — термопреобразователь; 3 — элемент крепления; 4 — оболочка твэл

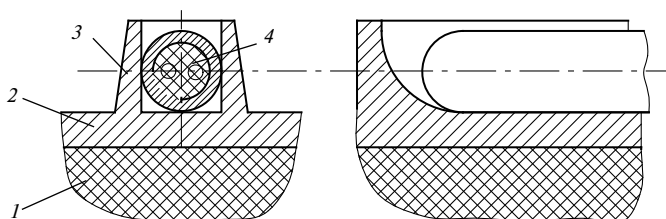


Рис. 4.5. Заделка термопреобразователя в дистанционирующее ребро твэл:

1 — топливо; 2 — оболочка твэл; 3 — дистанционирующее ребро; 4 — термопреобразователь

Измерение температуры топлива твэл — еще более сложная задача. При размещении преобразователя внутри твэл необходимо обеспечить герметичность узлов вывода преобразователя, исключающую выход высокорadioактивных газообразных продуктов деления, накапливающихся под оболочкой твэл до давления 5 МПа. Кроме того, в этом пространстве высок уровень температуры — до 1500—2000 К. Поэтому должны быть использованы термоэлектроды из вольфрамениевых сплавов. Так как эти термоэлектроды должны находиться в инертном газе или в достаточно глубоком вакууме, в пределах твэл должен быть осуществлен переход от вольфрамениевых термоэлектродов к другим термоэлектродам, например хромель-алюмелевым, которые выходят из твэл в окружающую воздушную среду. Пространство внутри твэл имеет весьма ограниченные размеры, поэтому преобразователь должен иметь малые поперечные размеры. Учитывая тяжелые условия работы твэл (высокие температуры, вибрации, значительные скорости изменения температуры и т.п.), трудно рассчитывать на продолжительную работу таких устройств. Однако даже за малое время работы такого преобразователя можно получить весьма полезные сведения об условиях работы твэл, особенно в переходных режимах работы.

4.1.3. Измерение температуры узлов реакторных установок

Важным является измерение температуры металлоконструкций реакторных установок, корпуса реактора, замедлителя, биологической защиты и т.п. Для этой цели часто используются поверхностные термоэлектрические преобразователи и термопреобразователи сопротивления. Когда такие устройства размещаются в неравномерном температурном поле, точность измерения температуры может быть невысока из-за утечек (или, наоборот, притечек) тепла от места расположения чувствительного элемента. Наиболее удобны для измерений этого рода кабельные преобразователи, иногда снабженные дополнительным защитным чехлом.

В реакторах типа РБМК графитовый замедлитель является одним из основных элементов активной зоны, который не подлежит замене за все время эксплуатации реактора. Длительность работы такой реакторной установки во многом определяется работоспособностью отражателя. Его сохранности уделяется особое внимание [57].

Измерение температуры графитовой кладки производится двумя типами термометрических сборок. Первый тип имеет в своем составе три кабельных термопреобразователя градуировки типа ХА, второй тип — пять термопреобразователей той же градуировки. Его рабочие спаи сборки разнесены по высоте. Схема размещения рабочих спаев приведена на рис. 4.6.

4.1.4. Нештатные устройства для измерения температуры в активной зоне

Устройства этого типа применяются чаще всего в период освоения нового типа реактора для исследования особенностей температурных полей, которые не могут быть измерены штатными устройствами из-за ограниченных возможностей к точности измерения,

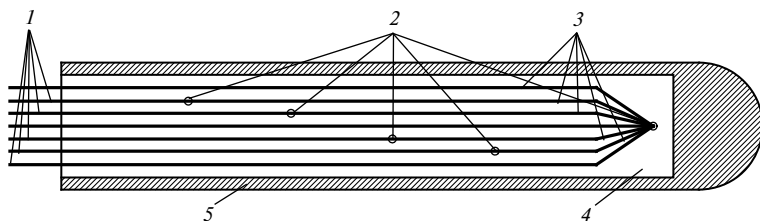


Рис. 4.6. Пятизонный преобразователь для измерения температуры графитовой кладки реакторов РБМК:

1 — хромелевые электроды; 2 — измерительные спаи; 3 — алюминиевые электроды; 4 — изоляция (оксид магния); 5 — оболочка (сплав ХН78Т)

быстродействию или из-за отсутствия преобразователей в интересующей точке активной зоны.

Примером могут быть термометрические зонды в реакторах различных типов. На рис. 4.7 представлена схема одной из модифика-

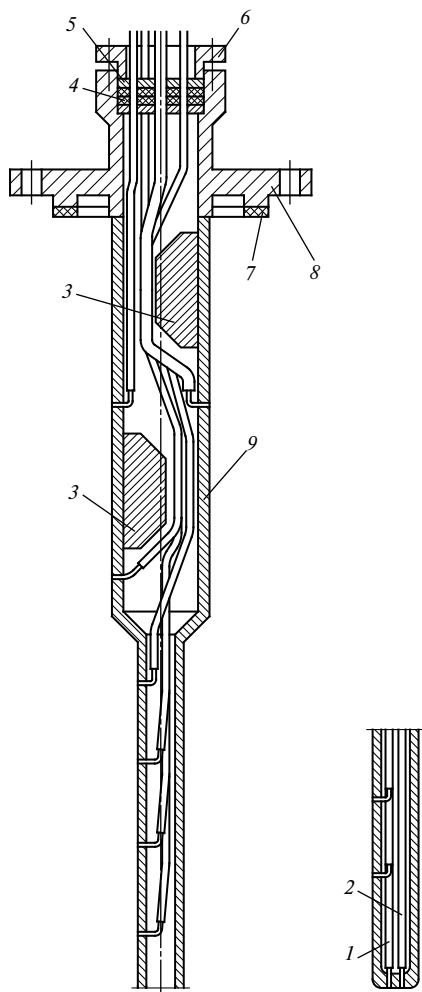


Рис. 4.7. Термометрический зонд реактора БН-600:

1, 2 — кабельная термопара; 3 — вкладыши; 4 — уплотнительная резина; 5 — решетка уплотнения; 6 — втулка уплотнения; 7 — уплотнительное кольцо; 8 — фланец; 9 — корпус

ций термометрического зонда, применявшегося в активной зоне в начале эксплуатации реактора БН-600. Зонд имеет два типа термопреобразователей: кабельные термопреобразователи типа ХА, рабочие спаи которых приварены к внутренней поверхности стенки зонда, и термопары «натрий—сталь», образованные натрием, натекающим на зонд из головки тепловыделяющей сборки, и стальным электродом, приваренным к внутренней поверхности зонда. Кроме того, в зонде размещались миниатюрные магнитные расходомеры, которые позволяли оценивать скорость натрия около зонда. Зонд устанавливался при нештатном расположении поворотной пробки так, что его конец входил в отверстие для захвата сборки ТВЭЛ.

Термопары типа хромель—натрий использовались также в реакторе БОР-60 в ГНЦ РФ НИИАР (г. Дмитровград).

4.2. Измерение температуры на реакторных установках

4.2.1. Энергетические реакторы типа ВВЭР

Энергетические реакторы типа ВВЭР — это реакторы корпусного типа. Их теплоносителем и замедлителем нейтронов является вода, циркулирующая через активную зону. Температура воды на выходе из активной зоны реактора ВВЭР-440 составляет 268 °С, реактора ВВЭР-1000 — 289 °С, ее давление 12,3 и 15,7 МПа, расход теплоносителя — 40 800 и 84 600 м³/ч соответственно.

Для обеспечения безопасности и экономичности эксплуатации реакторов этого типа необходимо измерение температуры теплоносителя в активной зоне и первом контуре. На реакторах ВВЭР-440 температура теплоносителя в надзонном пространстве измеряется 95-ю термоэлектрическими преобразователями, размещенными над головками тепловыделяющих сборок, и тремя такими же преобразователями в надзонном пространстве. В петлях главного циркуляционного контура температуру теплоносителя измеряют с помощью термоэлектрических преобразователей и термопреобразователей сопротивления. Термопреобразователи связаны с системой внутриреакторного контроля в системе АСУ ТП энергоблока. В табл. 4.1 приведены данные об объеме термоконтроля в реакторах ВВЭР-440.

Количество термоэлектрических преобразователей в СВРК избыточно: работа блока разрешается при выходе из строя до 25 % всех преобразователей. Вместе с тем важность измерений температуры подчеркивается тем, что, если система измерения температуры не

Таблица 4.1

Термоконтроль в системе внутриреакторного контроля реактора ВВЭР-440

№	Контролируемый узел	Тип термопреобразователя сопротивления, термопары	Количество, шт.
1	Под крышкой реактора в общем объеме на выходе из активной зоны	ТП	3
2	На выходе из тепловыделяющих кассет	ТП	95
3	Холодные спаев термопар	ТС	28
4	Корпус реактора	ТС	1
5	Холодные и горячие петли первого контура	ТП	16
6	Холодные спаи термопар в петлях	ТС	4
7	Питательная вода парогенератора	ТС	4
8	Питательная вода перед перегревателя высокого давления	ТС	2
9	Питательная вода после перегревателя высокого давления	ТС	2
10	Вода на входе в теплообменник промконтура	ТС	1
11	Вода на выходе в теплообменник промконтура	ТС	1

работает более 10—30 мин, мощность реактора должна уменьшаться или он вообще должен глушиться. Ресурс используемых на блоках ВВЭР-440 термоэлектрических преобразователей составляет 25—30 тыс. ч, ресурс самой реакторной установки определен в 250 тыс. ч. Поэтому в процессе эксплуатации блока неизбежна замена (модернизация) преобразователей.

Наиболее распространенными являются термоэлектрические преобразователи, имеющие диаметр защитного чехла 4 и 1,5 мм. Преобразователи меньшего размера дополнительно армируются стальным чехлом. Рабочие спаи термопар выполнены, как правило, в заземленном исполнении и снабжены специальными наконечниками.

На первых блоках ВВЭР-440 применялись хромель-копелевые термопары. Впоследствии основным проектным решением для ВВЭР стало применение хромель-алюмелевых кабельных преобразователей, размещенных в герметичных каналах. Замена хромель-копелевых термопар объясняется их большей термоэлектрической неста-

бильностью, чем у хромель-алюмелевых термопары. Так, согласно ГОСТ Р 8.585—2001 хромель-копелевые термопары могут иметь только классы допусков 2 и 3, хромель-алюмелевые — классы допусков 1, 2 и 3.

Штатные семиметровые каналы термоконтроля имеют внутренний диаметр 8 и внешний — 20 мм. Наконечники каналов несколько отличаются по конструктивному исполнению в реакторах разных проектов. Например, в реакторах ВВЭР-440 (В-213) наконечник имеет внешний диаметр 8,5 мм и внутренний посадочный диаметр 4 мм. Верхние концы каналов заделаны в плиту блока защитных труб, на которой помещены термостаты для компенсации температуры холодных спаев термопар. Каждый из термостатов имеет по два платиновых термопреобразователя сопротивления и 18 пар клемм для подключения термоэлектрических преобразователей.

В табл. 4.2 приведены средства изменений температур для первой модификации реактора ВВЭР-1000, в табл. 4.3 — для серийной модификации этого реактора (В-230).

Погрешность измерения температуры теплоносителя в ВВЭР нормирована и не должна превышать 1 °С для термопар с индивидуальной градуировкой (при доверительной вероятности 0,95).

Система термоконтроля реакторов типа ВВЭР имеет следующие особенности. Штатные так называемые «сухие» термопреобразователи, устанавливаемые с минимальным зазором в специальные технологические каналы (гильзы), за счет радиационного разогрева рабочего спая дают несколько завышенные показания по отношению к температуре теплоносителя. При длительной эксплуатации термопреобразователи охрупчиваются и при извлечении их из канала часто обрываются. Оставшуюся в канале оборванную часть преобразователя высверливают и частично извлекают. При этом торец термопарного канала просверливается насквозь. В результате внутренняя полость канала сообщается с теплоносителем — водой и заполняется ею. На место извлеченного преобразователя устанавливается новый преобразователь, который теперь непосредственно контактирует с водой. «Мокрый» преобразователь имеет улучшенный тепловой контакт с теплоносителем. Поэтому его радиационный разогрев меньше и его показания более точны. Измерения показаний «мокрых» преобразователей выявили, что «сухие» преобразователи перегреваются на 0,6—1,0 К (по другим данным до 2 К). Однако низкая механическая стойкость, обусловленная коррозионным воздействием воды, высокой температурой и излучением, приводит к быст-

Таблица 4.2

Средства измерений температур для реактора ВВЭР-1000

Тип преобразователя, устройство	Функции, место подключения
ТХА, ТХК	Контроль температуры в гермозоне теплоносителя на выходе из тепловыделяющей сборки и в петлях главного циркуляционного трубопровода, корпуса реактора, корпуса компенсатора давления
ТХА, ТХК	Контроль температуры воды, пара, воздуха и масла вне гермозоны
ТХА, ТХК	Контроль температуры поверхности оборудования вне гермозоны
ТСМ, ТСП	Контроль температуры воды, пара, воздуха и масла вне гермозоны
ТСМ, ТСП	Контроль температуры подшипников, поверхности оборудования вне гермозоны
ТСП	Контроль температуры в гермозоне теплоносителя в петлях главного циркуляционного трубопровода, в компенсаторе давления и трубопроводах системы компенсатора давления, корпусов реактора, компенсатора давления, парогенераторов, трубопроводов системы компенсатора давления
ТСП	Контроль температуры шахтного объема реактора
ТСП	Контроль температуры главного циркуляционного насосного агрегата
ТСП	Контроль температуры свободных (холодных) концов термоэлектрических преобразователей температуры
Устройство подключения термоэлектрических преобразователей температуры	Подключение внутриреакторных преобразователей температуры к кабельным трассам с пассивной компенсацией температуры свободных концов
Компенсационное устройство подключения термоэлектрических преобразователей температуры	Подключение внутриреакторных преобразователей температуры к кабельным трассам с пассивной и активной компенсацией температуры свободных концов

4.2. Измерение температуры на реакторных установках

Таблица 4.3

Термический контроль оборудования реактора ВВЭР-1000 (модификация В-320)

Зона измерения температуры	Тип датчика	Количество датчиков, шт.
Поверхность корпуса реактора	ТС	2
Теплоноситель под крышкой реактора	ТП	3
Теплоноситель на выходе из тепловыделяющей сборки	ТП	95
Теплоноситель в петлях главного циркуляционного трубопровода	ТП	192
Бетонные консоли шахты реактора	ТС	3
Металл фермы опорной шахты реактора	ТС	3
Пар в компенсаторе давления	ТС	1
Теплоноситель в компенсаторе давления	ТС	3
Поверхности корпуса компенсатора давления	ТП	1
	ТС	1
Теплоноситель в соединительном трубопроводе компенсатора давления	ТС	2
Поверхность соединительного трубопровода компенсатора давления	ТС	1
Среда (пар, вода) в трубопроводе сброса из компенсатора давления	ТС	1
Среда (пар, вода) в барботере	ТС	1
Теплоноситель в гидроемкостях системы аварийного охлаждения зоны	ТС	12
Поверхность корпуса гидроемкостей системы аварийного охлаждения зоны	ТС	4
Поверхность корпуса парогенераторов	ТС	16
Главные циркуляционные насосы	ТС	140

рому падению сопротивления изоляции и выходу «мокрого» преобразователя из строя.

Для уменьшения методической погрешности из-за радиационного разогрева зазор между внешним чехлом и рабочим концом «сухого» преобразователя для увеличения теплопроводности заполняется уплотнением на основе борной кислоты. Из-за ее кристаллизации в зазоре извлечение преобразователя затрудняется. Для надежного извлечения предлагается электроразогрев термоэлектродов путем пропускания электрического тока с одновременным механическим воздействием — извлечением. Однако доля успешно извлекаемых

таким способом преобразователей невысока, что ограничивает этот прием для широкого применения.

Таким образом, одной из основных задач метрологического обеспечения температурных измерений в реакторных установках с ВВЭР стала отработка надежной диагностики качества установки термопар в измерительном канале и создание методики оценки дополнительной методической погрешности. При наличии такой методики, а также средств ее реализации было бы допустимо обоснованное увеличение зазора «термопара — наконечник канала», что сняло бы проблему, связанную с заменой термопар.

К недостаткам существующего метрологического обеспечения на реакторах этого типа можно отнести:

- отсутствие средств и методик дистанционной экспресс-диагностики качества установки и текущего технического состояния термопар;
- методики оценки температурной погрешности радиационного разогрева термопары не обеспечивают учет таких влияющих факторов, как условия теплообмена рабочего спая термопары, продольные перетечки тепла и др.;
- методики оценки температурной погрешности, обусловленной дрейфом градуировки термопары, не учитывают неоднородность температурного поля вдоль облучаемой термопары, спектр нейтронного потока и т.п.

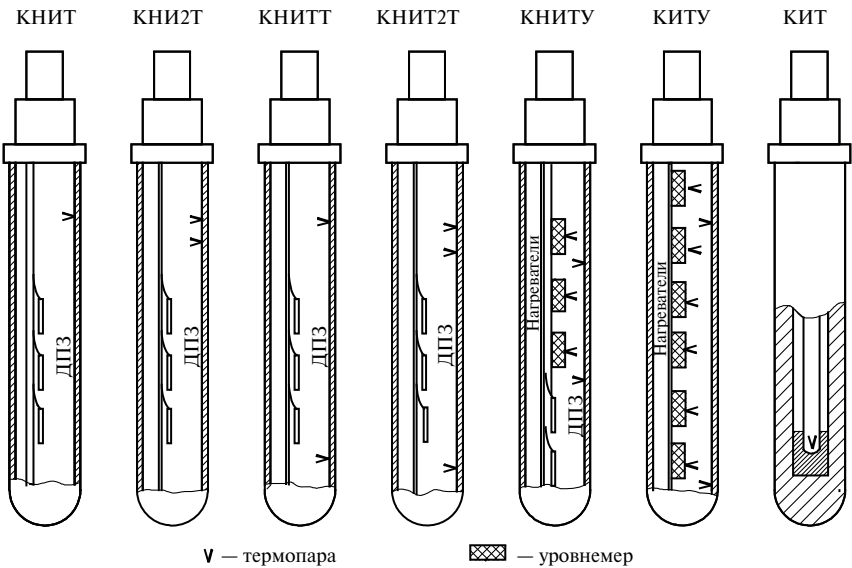
Отсутствие необходимых средств измерений и несовершенство методик снижают достоверность результатов измерений температуры теплоносителя, затрудняют принятие решений о допустимых сроках эксплуатации и о необходимости замены термопар.

В современных реакторах этого типа (АЭС в Китае) в активной зоне установлены сборки внутриреакторных датчиков (СВРД), в состав которых входят преобразователи различных параметров: температуры, энерговыделения, уровня теплоносителя. В табл. 4.4 перечислены типы датчиков в СВРД, которые могут быть установлены в активной зоне реактора. На рис. 4.8 приведены схемы этих типов датчиков. Отметим, что впервые, кроме преобразователей температуры и энерговыделения, используется преобразователь уровня воды в активной зоне [58].

Испытания системы температурных измерений на энергоблоке ВВЭР проводят при пусконаладочных работах на этапах *горячей обкатки, физического пуска и энергопуска* [14]. Проведению испытаний предшествует *входной контроль* СИ температуры (термоэлектрических преобразователей и термопреобразователей сопротивле-

Типы датчиков сборки внутриреакторных датчиков реактора типа ВВЭР

* ТВС — тепловыделяющая сборка.



ния). Он заключается главным образом в визуальном осмотре и измерении геометрических размеров преобразователей. Измеряется электрическое сопротивление термоэлектродов, проверяются герметичность оболочки термопарного кабеля, тепловая инерция преобразователя, проводится рентгенографический контроль качества рабочего спая термопар.

На этапе горячей обкатки проверяют функционирование всех систем и устройств блока. Разогрев циркулирующего теплоносителя производится за счет тепла, выделяющегося при работе главных циркуляционных насосов петель первого контура.

Для проверки системы ВРК и расчета калибровочных коэффициентов термоэлектрических преобразователей, а также алгоритмов обработки информации на этапе горячей обкатки предусмотрены пять режимов при постоянной или медленно изменяющейся температуре теплоносителя (табл. 4.5). В режимах 1 и 2 производится общая проверка функционирования системы термоконтроля, в режимах 3, 4 и 5 проверка функционирования продолжается. Кроме того, производится градуировка термоэлектрических преобразователей путем сличения их показаний с показаниями термометров сопротивления, расположенных на петлях первого контура реактора.

На этапе физического пуска проверяют правильность работы системы температурного контроля.

На этапе энергопуска мощность реактора составляет не более 20 % номинального значения. При этом продолжается проверка работоспособности термоэлектрических преобразователей, термопреобразователей сопротивления петель контуров и устройств компенсации температуры холодных спаев. Эта проверка аналогична проверке при горячей обкатке. Перед началом проверки добиваются выравнивания температур теплоносителя на входе в реактор по показаниям термопреобразователей сопротивления холодных ниток. Разность температур не должна превышать 0,5 °С [14].

Таблица 4.5

Таблица режимов на этапе горячей обкатки

Номер режима	Температура, °С	Продолжительность, ч
1	100—110	1
2	150—160	2
3	200—210	2
4	230—240	2
5	280—300	2 раза по 2 ч

4.2.2. Энергетические реакторы типа РБМК

Энергетические реакторы большой мощности канального типа, водографитовые типа РБМК эксплуатируются на 11 блоках в России. Электрическая мощность блока каждого составляет 1000 МВт. На Игналинской АЭС установленная мощность блока — 1500 МВт. В настоящее время она выведена из эксплуатации.

После аварии на Чернобыльской АЭС была проведена значительная работа по модернизации блоков этой конструкции, целью и следствием которой явилось существенное повышение надежности и безопасности эксплуатации.

Особенности температурных измерений в реакторе типа РБМК обусловлены конструкцией канального водографитового реактора. Ее достоинствами является доступность для контроля практически любого элемента реактора, включая элементы активной зоны. В активной зоне расположены 1693 технологических канала, 223 канала стержни управления и защиты (СУЗ), 156 каналов охлаждения отражателя. Перечень точек контроля реактора приведен в табл. 4.6, схемы их расположения — на рис. 4.9 и 4.10 [57].

Из 7 тыс. точек технологического контроля на реакторной установке 5 тыс. точек подвергают теплотехническому контролю, из которых примерно 3 тыс. точек контроля температуры. Внутризон-

Таблица 4.6

Перечень мест измерения температуры реактора РБМК

Место измерения	Температура, °С	Среда	Срок службы, лет
Графитовая кладка в пяти точках по высоте активной зоны	800	He + N ₂ CO	5
Оболочки твэл. Тепловыделяющая сборка измерительная РБМК-1000	900	Пароводяная смесь	—
Измерительно-диагностическая тепловыделяющая сборка измерительная реакторов РБМК-1000, РБМК-1500	До 450	—	—
Элементы реактора	600	Воздух	5
Водная защита	300	Воздух	5
Импульсные трубки системы контроля целостности технологических каналов	100	He + N ₂ CO	5

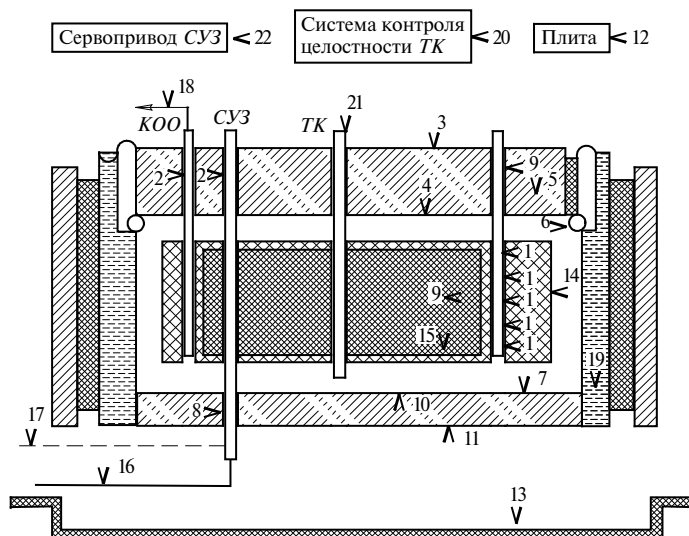


Рис. 4.9. Расположение точек термоконтроля в реакторе РБМК:

1—22 — термопары; КОО — канал охлаждения отражателя; СУЗ — стержень управления защиты; ТК — технологический канал

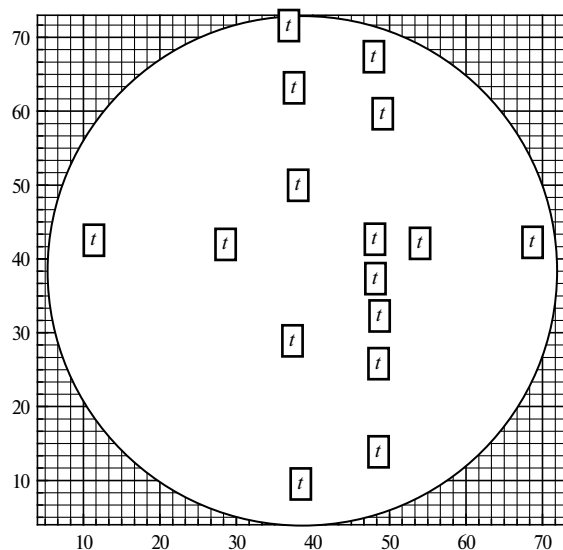


Рис. 4.10. Расположение точек термоконтроля в сечении реактора РБМК

ные температурные измерения проводят в 150 точках (85 точек на графитовой кладке, 65 точек на твэл). Остальные измерения температуры проводят на металлоконструкциях, устройствах биологической защиты (всего около 800 шт.), сервоприводах СУЗ (191 шт.) и др. Измерения температуры проводят с помощью кабельных термоэлектрических преобразователей градуировок ХА и ХК. При большом числе точек контроля температура измеряется лишь шестью типами преобразователей.

Специфическими и сложными для водографитовых реакторов являются устройства контроля температуры графитовой кладки, предназначенные для поддержания графита в оптимальном режиме работы в течение всего назначенного срока службы (30 лет) [57]. Устройство включает пять однозонных термоэлектрических преобразователей диаметром 4,6 мм с оболочкой из сплава ХН78Т. В верхней части зоны имеется массивная пробка биологической защиты, по винтовым пазам которой выводятся кабели преобразователя к клеммной коробке. Весь блок является неразборной конструкцией, которая устанавливается в ячейку кладки, а затем, после выработки ресурса, извлекается для утилизации.

Кроме штатных сборок термопар на этих реакторах применялись экспериментальные измерительные устройства — измерительно-диагностические тепловыделяющие сборки. Они представляли собой сборку твэл с преобразователями температуры оболочки, теплового потока, температуры топлива, давления внутри твэл, удлинения оболочки твэл, энерговыделения (табл. 4.7). В частности, с их помощью на стадии освоения проектной мощности реактора РБМК-1500 Игналинской АЭС была получена информация о температуре в центре топлива твэл.

Для реакторов РБМК-1000 были разработаны термометрические тепловыделяющие сборки для измерения температуры оболочки нескольких твэл. Они были введены в регламент по четыре сборки на реактор.

В реакторах типа РБМК система аварийной защиты (АЗ) по разрыву технологического канала (ТК) в реакторном пространстве действует лишь по одному параметру — повышению давления в реакторном пространстве и на выходе парогазовой смеси из него. В соответствии с международными требованиями по обеспечению безопасности АЭС сигнал об аварии должен дублироваться сигналом преобразователя, основанным по другому принципу действия. Применительно к системе парогазовых сбросов реактора РБМК был разработан блок термоэлектрических преобразователей (БТП), контро-

Таблица 4.7
Термометрические твэл, тепловыделяющие сборки, измерительно-диагностические тепловыделяющие сборки с оболочками из циркониевых сплавов

Реактор или стенд	Тип твэл и ТВС	Количество	Тип и количество ТЭП и других датчиков	Количество ТЭП	Способ заделки ТЭП	Цель исследований
АИ (АИ-ПВЦ) ХК «Маяк»	Термометрические твэл с двойной оболочкой	8	ХА, ВР По 6 ТЭП на твэл	6	Заливка силумином	Проверка работоспособности твэл РЕМК-1000 и РЕМК-1500
РЕМК-1000 ЛАЭС 1,2	Термический твэл	—	ХА	16		Испытания опытных образцов ТВС. Полу-кризные испытания
РЕМК-1000, ЛАЭС, САЭС, КАЭС, ЧАЭС	Штатные ТВС	4	ХА	16		Проверка штатных ТВС
Стенд БМ НИКИЭТ	Экспериментальный твэл	—	ХА	8	«В карман»	Моделирование тяжелой аварии
РЕМК-1500 ИАЭС	ИДТВС	8	ХА, ВР	—	Заливка силумином в таблетки	Проверка режимов работы исследовательских датчиков ТВС
ИГР, ГИДРА ИАЭ, НПО «Луч»	Экспериментальный твэл	—	ВР, ИР, ХА	—	В карман	Ампульные реакторные испытания с расплавлением топлива твэл
АМБ-1,2, Билибская БАЭС	ТВС, РЕМК-КП	—	ХА, ВР	—		Проверка работоспособности ТВС
ИВВ-2М (ампульные)	Штатные твэл	4	ХА, ВР	—		Ампульные испытания твэл с эрбиевым топливом

лирующий температуру на выходе парогазовой смеси из реакторного пространства. Блок содержит четыре независимых термоэлектрических преобразователя кабельного типа переменного диаметра 3/1,5 мм. В результате испытаний было показано, что БТП удовлетворяет всем требованиям работы в системе АЗ. При этом быстродействие БТП практически не отличалось от быстродействия датчиков давления. Надежность подсистемы аварийной защиты реактора с четырьмя блоками термоэлектрических преобразователей за срок службы составляет 0,998. Динамическая прочность БТП обеспечивается при скоростях потока пара до 300 м/с и температуре до 400 °С.

В прототипах реакторов РБМК — промышленных реакторах количество точек контроля температурных также велико и превышает 1000 шт. Однако вместо термоэлектрических преобразователей применяются платиновые термопреобразователи сопротивления (допустимая погрешность измерения температуры — не выше 0,5 °С).

4.2.3. Реакторы Билибинской АТЭЦ

Билибинская АТЭЦ имеет водографитовый реактор канального типа (подобный РБМК). Реактор предназначен для выработки электрической энергии и тепла для промышленных и коммунальных целей. Электрическая мощность каждого из четырех реакторов составляет 12 МВт. Перечень точек контроля температуры приводится в табл. 4.8.

Для контроля системы охлаждения каналов СУЗ измеряют температуру на выходе из каждого канала СУЗ (по вызову с блочного щита управления), а также давление и расход воды. В системе температурного контроля отдельных узлов реактора предусмотрено измерение температуры нижней плиты и кожуха, верхней плиты, бака биологической защиты и графитовой кладки. Измерение температуры плит производится на верхних и нижних листах. Эффективность охлаждения нижней плиты бака биологической защиты определяется по температурам воды в баке и нижней плиты, а также по температуре охлаждающей воды на выходе из змеевиков охлаждения. Замеры температуры плит и в баке производятся с помощью платиновых термопреобразователей сопротивления, температуры кожуха — термопарой ХА. Кроме того, предусмотрен контроль за давлением воды на входе и напором каждого насоса охлаждения СУЗ, давлением воды на охлаждение подшипников этого насоса, а также и контроль с блочного щита управления (по вызову) температуры воды во всасывающих коллекторах основных и аварийных насосов.

Таблица 4.8

Перечень точек контроля температуры активной зоны блоков Билибинской АТЭЦ

Контролируемое оборудование, теплоноситель	Температура, °С	Тип преобразователя	Количество точек контроля	Примечание
Бетонное основание реактора под нижней плитой	150	ТСП	3	Замена невозможна
Нижние листы нижней плиты	200	ТСП	4	То же
Верхние листы нижней плиты	200	ТСП	6	»
Нижний лист верхней плиты	400	ТСП	4	»
Верхний лист верхней плиты	400	ТСП	4	—
Кожух реактора, нижняя и центральная части	600	ТХА	4	2 шт. — «горячий» резерв
Наружная оболочка твэл температурных тепловыделяющих сборок, центральная часть, верх активной зоны	500	ТХА	2 точки на ТВС, 1—3 точки ТВС на реактор	Замена вместе с ТВС-Т
Теплоноситель на выходе из тепловыделяющих сборок	300	ТХК	12	—
Теплоноситель в опускных трубах	300	ТХК	6	—
Раздаточный коллектор каналов стержней управления защиты	150	ТХК	1	—
Вода на выходе из каналов стержней управления защиты	—	ТХК	60	—
Вода в секции блока биозащиты	100	ТСП	8	—
Вода на выходезмеевиков охлаждения блоков биологической защиты	100	ТСП	1	—
Вода в нижней плите под верхним листом	100	ТСП	3	Замена невозможна
Вода на выходе иззмеевиков охлаждения нижней плиты	100	ТСП	1	—
Вода во входном коллекторе на охлаждение	100	ТСП	1	—
Поверхность барабана-сепаратора	300	ТХК	15	—
Графит в ячейке датчика энерговыделения	1000	ТХА 3-х зонный	1—2	Поверка невозможна

Все замеры температуры плит и бака производятся термопреобразователями сопротивления, которые через специально проложенные трубы заводятся в чехлы. Температура кожуха измеряется хромель-алюмелевым преобразователем. Все термопреобразователи выводятся через бак биологической защиты через специальные закладные барабаны.

Для контроля температуры графитовой кладки используется трехзонный термоэлектрический преобразователь, устанавливаемый в одну из ячеек датчиков энерговыделения.

Для контроля мощности каналов (установлено 12 специальных контрольных каналов — по два в каждой энергетической группе) измеряются расход и температура теплоносителя на выходе из канала и температура оболочки твэл. Для этого используются поверхностные термомпары, заделанные на рабочем канале.

4.2.4. Энергетические реакторы на быстрых нейтронах

Отечественные быстрые реакторы

Реактор БН-350 первый полупромышленный реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, предназначенный для производства электроэнергии и опреснения морской воды, был построен в 1975 г. Его установленная электрическая мощность — 150 МВт, остальная тепловая мощность используется для опреснения. После инцидентов с негерметичными парогенераторами реактор эксплуатировался при пониженной мощности.

Контроль температуры в активной зоне реактора осуществляется двумя группами хромель-алюмелевых термопреобразователей. Одна из них (4 шт.) расположена в центральной поворотной колонне над головками сборок тепловыделяющих элементов, другая (8 шт.) — в верхней переливной камере. Термомпары расположены в защитных чехлах, их постоянная времени составляет 10 с. Заметим, что постоянная времени твэл для реактора этого типа составляет 2 с. Поэтому использование таких термомпар для организации канала безопасности достаточно проблематично. Часть термомпар представляют собой недемонтируемые устройства. Другая часть микротермомпар может быть демонтируема.

В настоящее время реактор выведен из эксплуатации.

Реактор БН-600 первый и единственный в мире успешно действующий промышленный реактор на быстрых нейтронах, был введен в эксплуатацию в 1980 г. Теплоносителем реактора является расплавленный натрий. Электрическая мощность реактора составляет 600 МВт.

Для измерения температуры в реакторе 20 термоэлектрических преобразователей находятся над сборками твэл и восемь термопреобразователей — в верхней переливной камере. Их постоянная времени примерно равна 20—25 с.

В дополнение к штатным термопреобразователям в реакторе в начале эксплуатации были использованы термометрические зонды. Их концы располагались в рассверленной головке сборки твэл. Зонд имел четыре термопары градуировки ХА и одну термопару «натрий-сталь» (см. п. 2.2.1).

Реактор БН-800. Так же, как и в других реакторах типа БН, в этом реакторе в качестве теплоносителя используется расплавленный натрий. Температурный контроль предполагается производить с помощью 37 термопар, располагаемых в центральной вращающейся колонне на расстоянии 100 мм выше сборок твэл. Эти термопары перекрывают примерно половину активной зоны. Постоянные времени составляют примерно 5 с. Конструктивно эти термопары подобны термопреобразователям реакторов БН-350 и БН-600.

Зарубежные реакторы на быстрых нейтронах

Франция. На экспериментальном реакторе «Рапсодия» с натриевым охлаждением термоэлектрическими термопреобразователями оснащены все сборки активной зоны.

На реакторе «Феникс» установлено по два термопреобразователя над каждой из кассет. Внешний диаметр защитного чехла термопреобразователя равен 1 мм. При необходимости термопреобразователи могут быть заменены.

Реактор «Суперфеникс» имеет два персональных компьютера, работающих в режиме реального времени. С их помощью обрабатываются сигналы 2×469 термопар на выходе из зоны. Целью измерений температуры является предотвращение гидродинамических нарушений (блокада проходных сечений, превышение температуры). Для этого используют «быстрые» термопары с чувствительным элементом «натрий-сталь».

Индия. На выходе из каждой сборки твэл строящегося индийского быстрого натриевого реактора установлены два хромель-алюмелевых термопреобразователя и одна термопара «натрий-сталь». Диаметр защитного чехла термопар составляет 1 мм, постоянная времени — 100 мс. Посредством двух персональных компьютеров измеренные значения сравниваются с расчетными значениями выходной температуры, скорости роста температуры для каждой из сборок и

зоны в целом. При возникновении расхождений возможна медленная остановка реактора.

США. На реакторе на быстрых нейтронах «Энрико Ферми» часть сборок активной зоны контролировалась хромель-алюмелевыми термопреобразователями, устанавливаемыми в «пальцах» прижимного механизма, удерживающего кассеты от всплывания в потоке натрия.

На реакторе EBR-2 был установлен 21 термопреобразователь специальной конструкции для измерения температуры в активной зоне. Преобразователь представляет собой камеру с натрием. Измерение температуры основана на термическом расширении натрия, отличающемся от расширения материала камеры из нержавеющей стали. Из 28 хромель-алюмелевых термопреобразователей с изоляцией из оксида магния для изучения трехмерного температурного поля в активной сборке два преобразователя были установлены около входных расходомеров, пять — в середине зоны, 13 — на верхнем крае зоны, четыре — над зоной, два — в выходе из сборки и два — в наконечнике сборки. Для измерения температуры от низа зоны до входных устройств использовались 26 термоэлектрических преобразователей.

Великобритания. Реактор на быстрых нейтронах PFR с натриевым теплоносителем имел систему контроля температуры на выходе из всех тепловыделяющихборок, подобную той, которая установлена на реакторе «Феникс».

Рассматривалось применение для контроля температуры в быстрых жидкометаллических реакторах, в том числе для измерения температурного поля, ультразвуковых преобразователей температуры, испытания которых в потоке натрия показали удовлетворительные результаты (см. гл. 5).

ФРГ. Реактор KNK-II имеет две субзоны. Каждая субзона снабжена тремя термоэлектрическими преобразователями с минеральной изоляцией в чехле диаметром 1,5 мм, установленными на выходе натриевого теплоносителя из зоны. Теплоноситель попадает на преобразователи после смесителя. Аналогичные преобразователи установлены в экспериментальных зонах по три преобразователя на каждую зону. На входе в зону установлены три преобразователя в каждой петле. Реактор выведен из эксплуатации.

4.2.5. Исследовательские реакторы

В исследовательских реакторах важную роль играют не только штатные системы контроля температуры зоны и теплоносителя, но и измерения температуры в экспериментальных устройствах. От этих измерений зависит качество реакторного эксперимента. В этих слу-

чаях разработка средств измерений температуры проводится совместно с разработкой экспериментальных устройств, в большинстве случаев уникальных.

Высокая стоимость эксперимента и стремление к минимизации риска его срыва вынуждают часто отодвигать на второй план достижение высоких показателей точности измерения параметров эксперимента, в том числе и температуры. Далее в качестве примера рассматривается термометрическая система одного из исследовательских реакторов.

Реактор СМ-3

Общая характеристика. Реактор расположен в ГНЦ РФ НИИАР, в г. Дмитровграде Ульяновской обл. Его назначение — испытания макетов твэл, высокодозные облучения конструкционных, поглощающих и топливных материалов, накопление трансурановых элементов и радиоизотопной продукции с высокой удельной активностью [59].

Измерения температуры для целей управления реактором (технологические измерения) осуществляются при помощи штатной системы «КИП и А». В соответствии с проектом штатные показывающие приборы (в том числе самопишущие) установлены в пультовом помещении, из которого осуществляется оперативное управление реактором.

В 80-х годах прошлого века на реакторной установке была установлена специализированная информационно-измерительная система (ИИС), которая осуществляет автоматическое измерение технологических параметров, главным образом теплотехнических. Она работает параллельно со штатной системой «КИП и А», использует сигналы тех же датчиков, и выполняет функции советчика оператора (определяющими являются показания штатных приборов на пульте). Информационно-измерительная система была изготовлена на базе отечественной электроники и вычислительной техники.

В настоящее время спроектирована и монтируется новая ИИС на базе современных измерительных преобразователей и вычислительной техники (промышленных компьютеров). Новая ИИС будет обладать лучшими характеристиками и более широкими возможностями как при управлении реактором (в функции АСУ ТП), так и при проведении на нем научных исследований (в функции АСНИ).

Информационно-измерительная система будет осуществлять сбор и обработку информации о работе реактора и его экспериментальных устройств, представление информации оперативному и эксплуа-

тационному персоналу РУ. В процессе работы ИИС будет регистрировать измеряемые и расчетные параметры, а также их отклонения от нормы, в частности, разность давлений и температур, тепловую мощность, запас реактивности, выгорание топлива в ТВС и т.п.

Текущие значения параметров будут отображаться на дисплеях соответствующих мониторов в виде графиков, гистограмм, таблиц и т.п. При отклонении значений параметров от уставок предусмотрена подача звуковых и световых сигналов. По запросу оператора ИИС будет выдавать необходимую измерительную и расчетную информацию в заданной форме, в том числе и на бумажном носителе. Значения измеренных параметров архивируются с тем, чтобы можно было при необходимости восстановить историю их изменений за требуемый промежуток времени.

При введении ИИС в эксплуатацию штатные приборы системы «КИП и А» будут выполнять резервные функции в случае выхода из строя ИИС или ее отдельных составляющих устройств.

Система измерения температуры. Система измерения температуры включает 120 измерительных каналов, имеющих в качестве первичных преобразователей платиновые термопреобразователи сопротивления (ТСП) градуировки 21 (95 шт.), термоэлектрические преобразователи типов ХК (13 шт.) и ХА (12 шт.).

В ИИС нового поколения предполагается использовать те же преобразователи, что и в старой, в которой они соответствуют проекту штатной системы «КИП и А». Сигнал преобразователя разветвляют и подают параллельно на штатные показывающие приборы в пультной и на измерительные устройства ИИС.

Использование старых платиновых термопреобразователей сопротивления вызвало некоторые трудности при разработке новой ИИС из-за небольшого несоответствия их градуировки характеристикам, на которые рассчитаны импортные измерительные преобразователи Pt-100. Выход из положения был найден за счет небольшого увеличения погрешности измерения.

Точки контроля размещены в технических системах первого и второго контуров охлаждения и экспериментальных устройств (водяных петель) реактора.

В технических системах первого контура размещено 27 точек контроля, в которых измеряют:

- температуру дистиллята воды на входе и выходе из активной зоны по четырем «ниткам» — 10 точек (платиновые термометры сопротивления — ТСП), диапазон измеряемых температур 0—200 °С;

- температуру в узлах главного циркуляционного насоса (ГЦН), прокачивающих дистиллят по «ниткам» контура — восемь точек, в том числе четыре точки для измерения температуры статоров термopарами типа ХК, диапазон температур 0—300 °С, и четыре точки для измерения температуры подшипников термометром сопротивления ТСП, диапазон температур 0—100 °С;

- температуру дистиллята непосредственно под активной зоной — две точки преобразователя типа ХК, диапазон температур 0—200 °С;

- температуру в реакторе — одну точку преобразователем типа ХК, диапазон температур 0—200 °С;

- температуру дистиллята на входе в подшипники насоса — одну точку термометром сопротивления ТСП, диапазон температур 0—100 °С;

- температуру азота в верхней части контура аппарата — одну точку термометром сопротивления ТСП, диапазон температур 0—300 °С;

- четыре точки термометром сопротивления ТСП на других технических устройствах контура (контактном аппарате, дегазаторе и т.п.).

В системах второго контура размещено 12 точек измерения с платиновыми термопреобразователями сопротивления для измерения температуры технической воды на входе и выходе из теплообменников, а также промежуточного контура, вентиляции, пара. Диапазоны измеряемых температур 0—100 и 0—200 °С.

Остальные точки измерения (81 шт.) размещены в системах трех водяных петель (ВП) и на других технических устройствах реактора, в том числе:

- на петле ВП-1 — 22 преобразователя ТСП, диапазоны измерений 100—300 °С;

- на петле ВП-2 — 14 преобразователей ТСП, диапазоны измерений 100—400 °С;

- на петле ВП-3 — 40 преобразователей, из них 24 ТСП, диапазоны измерений 100—400 °С; 12 преобразователей типа ХА, диапазон измерений 0—1000 С; четыре преобразователя типа ХК, диапазон измерений 0—600 °С;

- на вспомогательных технических системах реактора (горячее водоснабжение и т.п.) пять преобразователей ТСП, диапазоны измерений 100—200 °С.

Реакторы БР-10, БОР-60, МИР-М1, ВК-50. Общие сведения о масштабе температурного контроля экспериментальных реакторных установок, находящихся в ГНЦ РФ НИИАР (г. Дмитровград), приведены в табл. 4.9.

4.2. Измерение температуры на реакторных установках

Таблица 4.9

Температурный контроль реакторов НИИАР

Показатель	Тип реактора		
	БОР-60	МИР	ВК-50
Количество измерительных каналов, шт.	16	20	4 (для определения тепловой мощности)
Тип первичных преобразователей	ХА, ХК	ТСП	3 ТСП, 1 ХК
Диапазон температуры, °С	0—600	0—100	0—100 и 0—300
Периодичность проверок	1 раз в год	1 раз в два года	1 раз в два года

В реакторе БОР-60 с натриевым теплоносителем осуществляется кассетный контроль температуры над тепловыделяющими сборками с помощью 31 хромель-алюмелевого преобразователя. Кроме того, восемь таких же преобразователей установлено над головками пакетов бокового экрана. Рабочие спаи преобразователей находятся на расстоянии 20 мм от головок пакетов.

На этом реакторе исследовалось распределение температур по высоте и сечению пакета с помощью специального термометрического пакета, оснащенного 15 кабельными преобразователями.

Реактор БР-10 (ГНЦ РФ ФЭИ) не оснащен штатной системой кассетного контроля температуры. Измерение температуры натрия осуществлялось на выходе из активной зоны реактора, а также в экспериментальных устройствах. Реактор выведен из эксплуатации.

Стенд КМ-1 представлял собой полномасштабный прототип ядерной энергетической установки со свинцово-висмутовым теплоносителем [60]. На стенде отработки проводились исследования тепловых режимов активной зоны реактора. В его состав входят паропроизводительная и паротурбинная установки. Первый контур состоит из реактора, трех петель с парогенераторами и циркуляционными насосами и других устройств, обеспечивающих надежную циркуляцию теплоносителя.

В активной зоне реактора было смонтировано экспериментальное термометрическое устройство в виде решетки, состоящей из большого количества преобразователей (более 100 шт.), расположенных в одном сечении. Термометрическая решетка позволяла измерять поле температур на выходе из активной зоны реактора. Кроме решетки в активной зоне был установлен термометрический твэл,

снабженный термоэлектрическими преобразователями и позволяющий измерять распределение температур по высоте активной зоны. При испытаниях использовались кабельные хромель-алюмелевые преобразователи с внешним диаметром чехла 3 и 1,5 мм.

4.2.6. Реакторы судовых установок и космического назначения

Количество термопреобразователей в реакторах судовых энергетических установок с водным и жидкометаллическим охлаждением невелико (несколько штук). Они располагаются на входе и выходе реактора и по петлям [61]. Контроль температуры ведется по трем независимым каналам, позволяющим оценивать температуры теплоносителя первого контура на входе в реактор на выходе из него и скорость разогрева и охлаждения теплоносителя первого контура.

Канал контроля температур включает в себя первичный термоэлектрический преобразователь, вторичный преобразователь, устройство линеаризации. Для исключения влияния погрешности линеаризации аварийная и предупредительная сигнализация формируется по нелинеаризированным сигналам. Для измерения температуры используются хромель-копелевые термопары, в некоторых случаях — платиновые термопреобразователи сопротивления.

Штатные активные зоны реакторных космических установок «Бук» и «Топаз» с натрий-калиевым теплоносителем также не оснащались термоэлектрическими преобразователями. Температурный контроль работы установок этих типов велся вдвоенной хромель-алюмелевой термопарой, расположенной в трубопроводе на выходе из активной зоны. Учитывая небольшой срок службы этих установок, особых вопросов такое решение не вызывало. Однако для проектов космических реакторных установок, рассчитанных на значительные ресурсы (до 10 лет и более) и на высокие температуры на выходе из реактора (более 900 °С), потребуются новые технические решения обеспечения точного измерения температур.

4.3. Технические основы обеспечения точности температурного контроля на реакторных установках

Основные погрешности измерения температуры на реакторных установках. Ранее были рассмотрены основные общие источники погрешностей измерения температуры с помощью термоэлектрических преобразователей и преобразователей сопротивления, в том числе из-за радиоактивного облучения. В этом разделе рассмот-

рены конкретные погрешности измерений температуры, а также способы их уменьшения.

В связи с тем, что в процессе эксплуатации метрологические характеристики СИ температуры могут претерпевать изменения, возникает потребность в регулярных поверках или калибровках СИ. Выполнение этих процедур для СИ температуры, работающих в активной зоне, затруднительно из-за сильной активации элементов конструкций преобразователей температуры. Поэтому актуальны бездемонтажные методы поверки (калибровки), при которых преобразователь не извлекается из активной зоны. Особенно привлекательны такие методы, которые позволили бы проводить поверку (калибровку) в реальном масштабе времени.

Радиационная составляющая погрешности измерений температуры. Как упоминалось ранее, спецификой внутриреакторных измерений температуры обусловлена так называемая радиационная составляющая погрешности измерения $\Delta T_{\text{рад}}$, включающая инструментальную $\Delta T_{\text{и}}$ и методическую $\Delta T_{\text{м}}$ компоненты. Инструментальная погрешность, в свою очередь, включает обратимую $\Delta T_{\text{обр}}$ (мгновенный эффект) и необратимую $\Delta T_{\text{но}}$ (интегральный эффект) компоненты. Эти погрешности являются систематическими. Они могут быть введены в виде поправок в результат измерения. Погрешности δT этих поправок суммируются по правилам, изложенным в [19]. В простейшем случае они алгебраически суммируются:

$$\Delta T_{\text{рад}} = \Delta T_{\text{и}} + \Delta T_{\text{м}} = \Delta T_{\text{обр}} + \Delta T_{\text{но}} + \Delta T_{\text{м}}.$$

Необратимые изменения термоэлектрических преобразователей типа ХА исследованы при флюенсах нейтронов до $(2 \div 3) \cdot 10^{22} \text{ см}^{-2}$. По различным данным они находятся в диапазоне $-7 \div 4 \text{ К}$. В то же время погрешность измерения температуры теплоносителя в реакторе ВВЭР не должна превышать 1 К. Отметим, что необратимые изменения вольфрамениевых преобразователей типа ВР5/20 при флюенсе тепловых нейтронов $0,7 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ и температуре 923 К достигали -100 К , а при флюенсе быстрых нейтронов $1,14 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ и температуре 733 К даже -250 К [62].

Литературные данные по влиянию флюенса нейтронов на изменение градуировки термодатчиков ВР 5/20 обобщены в докладе [47]. В нем была предложена следующая зависимость:

$$\Delta T_{\text{но}} = a_1 \Phi_{\text{т}} + a_2 \Phi_{\text{б}} \exp(a_3 T_{\text{пр}}),$$

где Φ_T и Φ_b — флюенсы тепловых и быстрых нейтронов; $T_{пр}$ — температура преобразователя, К; $a_1 = -13,686 \cdot 10^{-20}$; $a_2 = -7,69 \cdot 10^{-20}$; $a_3 = -0,0017$.

Из формулы видно, что при температуре выше 2000 К влияние быстрых нейтронов на градуировку этих термопар мало.

Методические погрешности. Существуют погрешности, обусловленные не преобразователями, а методиками их применения и обработки результатов измерений. Рассмотрим одну из наиболее существенных групп этих погрешностей, связанную с усреднением показаний преобразователей по пространственным координатам реактора ВВЭР [14].

Эксплуатационный персонал часто интересуют значения температуры, которые являются величинами, усредненными по сечениям зоны, петли или тепловыделяющим сборкам (ТВС). При неоднородностях температурного поля по этим сечениям показания локальных штатных преобразователей могут оказаться недостаточно информативными. Создание внутриреакторных преобразователей с распределенным (непрерывным по длине преобразователя) чувствительным элементом пока не увенчалось практическим успехом.

Одной из причин неизотермичности потока теплоносителя является возникновение стратификации потока — явления устойчивого существования плохо перемешиваемых слоев теплоносителя с разной температурой. Существуют методы оценки эффектов стратификации неизотермического потока теплоносителя в реакторах ВВЭР, влияющих на погрешность измерения температуры [14].

1. Эффект обусловлен неполным перемешиванием теплоносителя в активной зоне и камерах смешения. При работе реактора с неодинаково нагруженными петлями такой характер перемешивания приводит к неоднородности температурного поля по активной зоне. Для его изучения нужно использовать специальные режимы работы установки с захолаживанием отдельных петель и анализом показаний всего массива преобразователей. Путем определения коэффициентов влияния петель на тепловыделяющие сборки решаются вопросы оценки температур, например на входах в ТВС, в секторах нижней камеры смешения и т.п. Возможно, удастся повысить точность определения этих коэффициентов влияния с помощью анализа низкочастотных шумовых спектров преобразователей при работе реактора в штатных режимах.

2. Эффект связан со стратификацией потока теплоносителя в горячих нитках петель ВВЭР-1000. Из-за неполного перемешивания теп-

лоносителя в горячих нитках петлевые преобразователи реагируют на изменение температуры довольно ограниченных областей активной зоны. При движении регулирующих стержней происходит перераспределение поля тепловыделения по активной зоне. Поэтому в показаниях преобразователей одной петли может появиться расхождение, являющееся функцией положения стержней СУЗ. Этот эффект анализируется с помощью проецирования части активной зоны, с которой данная петля получает теплоноситель, на поперечное сечение горячей нитки петли [14]. При этом выяснилось, что каждый преобразователь хорошо реагирует на свою определенную группу ТВС. Зная эти группы, можно определить температуру в горячих нитках петель, усредненную по сечению трубопроводов петель.

Довольно сложным поведением могут отличаться флуктуации температуры петлевых подогревов при манипулировании стержнями СУЗ. Одна из причин этого явления — различие групп ТВС, на которые хорошо реагируют преобразователи в холодной и горячей нитках петли.

3. Эффект связан со струйными явлениями над головками ТВС. Наиболее сильно этот эффект проявляется в показаниях преобразователей, установленных над ТВС с выгорающим поглотителем. Для исключения влияния этого эффекта в настоящее время применяются различные конструктивные методы. Их суть состоит в том, что не допускается проток более холодной воды на гильзы с термопреобразователями путем установки различных отражателей и другими способами.

Межповерочные интервалы в реакторных установках. Проведение поверочных (калибровочных) работ на СИ температуры, извлеченных из активной зоны во время стояночного режима, затруднительно, в частности, из-за их сильной наведенной радиоактивности. На практике в реакторных блоках поверочные (калибровочные) работы в этих условиях заменяются так называемыми диагностическими работами, проводимыми во время горячих испытаний [14].

На реакторе БН-600 схема выбора межповерочных интервалов различается для термоэлектрических преобразователей, установленных непосредственно над активной зоной, и преобразователей в остальной части первого контура, практически не подвергающихся воздействию радиации.

Согласно принятым на Белоярской АЭС «Временным правилам ...», согласованным с метрологическими органами, после набора опреде-

ленного флюенса нейтронов (приблизительно каждые 2 года) производится извлечение из активной зоны 10 % преобразователей (2—3 шт.). Извлеченные преобразователи подвергаются поверке (калибровке) на специально созданной для этого установке с реперными металлами. Если эти преобразователи удовлетворяют исходным требованиям, считается, что оставшиеся над зоной преобразователи также удовлетворяют этим требованиям.

После замены или возврата преобразователей сравнивают показания всех преобразователей зоны между собой во время проведения изотермического режима, когда разогрев теплоносителя производится за счет тепловыделения в циркуляционном насосе контура. Таким образом, полная замена всех преобразователей зоны должна происходить приблизительно каждые 20 лет. Преобразователи остальной части первого контура заменяют после истечения их срока службы, который принят равным 5 годам.

Таким образом, имеет место выборочный, далеко не полный контроль преобразователей. Вероятность того, что непригодные преобразователи останутся в зоне, достаточно велика. Вместе с тем, снижается трудоемкость метрологических работ и материальные затраты.

На реакторах типа ВВЭР принята другая схема поверки (или проверки по терминологии [14]) достоверности показаний преобразователей в системе внутриреакторного контроля. Проверка состоит из двух этапов.

Первый этап проводят в период горячей обкатки первого контура или на мощности реактора 0,01—0,1 % номинальной. В этот период работают все главные циркуляционные насосы, организованный отвод тепла (с помощью теплообменников) не производится. Для этого периода характерна достаточная равномерность температурного поля по сечению и высоте активной зоны реактора и в петлях первого контура.

Второй этап проводят периодически или по необходимости при мощности реактора более 1 % номинальной.

Условием проведения этой проверки являются:

- минимальное влияние помех в измерительных цепях, достигаемое усреднением достаточного количества повторных измерений;
- штатное состояние систем ВРК (минимальные погрешности аналого-цифровых преобразователей и коммутаторов, установлены допустимые токи термопреобразователей сопротивления, положение термоэлектрических преобразователей — в штатных местах, преобразователи сопротивления прошли метрологическую поверку);

- соблюдена шестикратная симметрия загрузки топлива, положения органов регулирования эту симметрию не нарушают, при этом подогрев теплоносителя на симметричных каналах одинаков в пределах погрешности определения перепада температуры.

Проверку качества функционирования систем контроля температуры начинают с проверки стабильности показаний по петлям за 3—6 мин. Сравниваются показания термопреобразователей сопротивления и термоэлектрических преобразователей, которые не должны расходиться более, чем на 1,5 °С (обычно 0,4—0,8 °С). Показателем работоспособности каналов измерения температуры являются величины отклонения температуры в каждой точке термоконтроля от среднего значения температуры. Среднее квадратичное отклонение σ_M характеризует погрешность системы ВРК в целом:

$$\sigma_M = \sqrt{\frac{\sum (t_{km})^2}{M - (g + 1)}},$$

где Δt_{km} — отклонение температуры в каждой точке термоконтроля от среднего значения; M — общее число точек термоконтроля; g — число точек термоконтроля, исключенных из анализа.

Опыт показывает, что нормальное состояние системы характеризуется значением $\sigma_M \leq 1$ °С. Увеличение этой величины до 1,5 °С свидетельствует об ухудшении метрологических показателей вследствие следующих нарушений: изменения токов питания термопреобразователей сопротивления, ухудшения метрологических характеристик аналого-цифровых преобразователей и коммутаторов, повышения уровня помех. При $\sigma_M > 1,5$ °С подсистема термоконтроля требует профилактического ремонта.

Недостаток этой методики состоит в том, что она достоверна только в том случае, если зона радиационных и других структурных повреждений материала термопарных электродов в рабочем состоянии и в процессе проверки находится внутри изотермической зоны. Действительно, специально организованная изотермичность по водяному контуру исключает учет влияния градиента температуры вдоль термопарного канала на участке радиационного перерождения термоэлектродов, имеющего место в рабочем режиме реактора. Отсутствие градиента приводит к потере самого эффекта, который восстановится в эксплуатационных условиях, реализующих этот продольный градиент вдоль преобразователя.

Как упоминалось ранее, штатные преобразователи, устанавливаемые в специальные каналы (гильзы) с зазором, дают завышенные показания по отношению к температуре теплоносителя за счет радиационного разогрева рабочего спая преобразователя. Разогрев «сухих» термопреобразователей на 0,6—1,0 К (по другим источникам на примерно 2 К) выявила установка «мокрых» термодатчиков. Поэтому показания «мокрых» преобразователей более достоверны. Однако низкая механическая и коррозионная стойкость, обусловленная воздействием воды, высокой температуры и излучения, приводит к быстрому выходу из строя таких преобразователей.

Опираясь на оценку действительной температуры, определенной как температура, усредненная по всем надзонным преобразователям и (или) петлевым преобразователям, оценивается и вводится в показания поправка на аддитивную или мультипликативную поправку для каждого преобразователя.

Встречались случаи калибровки при температурном поле, неравномерном по зоне. Чаще всего такие неравномерности создаются непреднамеренно и обусловлены конструкцией аппарата. Диагностировать их можно, например, анализируя форму и временные особенности гистограмм отклонений показаний преобразователей и особенности низкочастотных шумовых характеристик показаний, хотя до сих пор критерии обнаружения этих неоднородностей до конца не формализованы. Другой причиной возникновения неоднородности температурного поля могут служить штатные манипуляции с арматурой и переходы с режима на режим. Так как эти неоднородности могут иметь масштаб в несколько градусов, то проведение калибровки при их наличии теряет смысл. Для этих случаев разработана специальная методика калибровки [14].

При неоднородности температурного поля по активной зоне калибровка может проводиться путем сравнения показаний каждого калибруемого преобразователя, находящегося над конкретной тепловыделяющей сборкой, с температурой, определенной как сумма показаний петлевых преобразователей сопротивления в холодных нитках петель. Они, в свою очередь, взвешены с соответствующими долями расхода теплоносителя через эту ТВС, обусловленными влиянием на эту ТВС каждой петли. Например, если в какую-либо ТВС поступает теплоноситель, 60 % которого вышло из первой петли, а 40 % — из второй, то за оценку действительной температуры принимается сумма взвешенных показаний термопреобразователей ($0,6t_1 + 0,4t_2$). Здесь t_1 и t_2 — показания термопреобразователя в первой и второй петлях соответственно. При оценке действительной температуры в отдельных слу-

чаях приходится учитывать временное изменение показаний различных преобразователей. Алгоритм по определению долей расхода (коэффициентов влияния петель на ТВС) изложен в [14].

Может быть, более перспективным, несмотря на свою трудоемкость, сложность исполнения и непредсказуемость ресурса, является рассверловка наконечников технологических каналов и последующая установка «мокрых» температурных преобразователей. Однако, как указывалось ранее, ресурс таких преобразователей невелик из-за коррозии стенки чехла в воде.

Таким образом, одной из основных задач метрологического обеспечения температурных измерений в реакторных установках с ВВЭР является отработка надежной диагностики качества установки преобразователей в измерительном канале и создание методики оценки дополнительной методической погрешности.

Калибровка преобразователей в «изотермическом» режиме проводилась на реакторе БН-350. Показания преобразователей сравнивались с показаниями преобразователей, установленных вне активной зоны — в петлях первого контура. Некоторые демонтируемые преобразователи, выбранные случайным образом, извлекались и подвергались калибровке вне реактора. Калибровкой не выявлено изменения градуировочных характеристик преобразователей за время эксплуатации.

Во всех описанных выше примерах производится не поверка, а калибровка преобразователей температуры. Преобразователи температуры претерпевают изменения функции преобразования. Поэтому в результате калибровочной процедуры фиксируется новая функция преобразования, которая может отличаться от исходной функции. Отметим, что калибровке, а не поверке подвергаются не только преобразователи температуры, но и некоторые другие преобразователи, в частности, преобразователи нейтронного потока (датчики прямой зарядки) в активной зоне.

Метрологическое обеспечение измерений температуры на реакторной установке СМ-3. Описание системы измерения температуры экспериментального реактора СМ-3 приведено в п. 4.2.5. Метрологическое обеспечение измерений, в том числе и температурных, осуществляет центральная метрологическая служба ГНЦ РФ НИИАР — Отдел метрологии и измерительной техники, аккредитованный Госстандартом РФ на право проведения поверки средств измерений.

Метрологическое обеспечение включает поверку (калибровку) и ремонт СИ, входящих как в штатную систему «КИП и А», так и в

информационно-измерительную систему, а также регулярную поверку ИИС в целом.

Поверку измерительных каналов производят 1 раз в 2 года. Исключение составляют измерительные каналы, измеряющие параметры, по которым рассчитывают тепловую мощность реактора (температура и расход теплоносителя в петлях первого контура). Эти измерительные каналы поверяют не реже 1 раза в год, возможны внеочередные поверки.

Поверку измерительных каналов производят с отсоединенными преобразователями, вместо которых в измерительные каналы подают эталонный сигнал. Источником сигнала является соответствующее эталонное СИ (чаще всего специальные калибраторы электрических сигналов), воспроизводящее сигнал в требуемом диапазоне с известной малой погрешностью. Таким образом, поверке подвергается часть измерительных каналов, включающая линии связи, вторичные измерительные преобразователи, устройства регистрации и обработки результатов измерений.

Первичные преобразователи (при измерении температуры — термоэлектрические преобразователи и термопреобразователи сопротивления) проходят поверку отдельно, а их погрешности при оценке погрешности измерительных каналов в целом (т.е. вместе с датчиком) учитываются расчетным путем по правилам, установленным нормативными документами.

Однако трудности, обусловленные высоким радиационным фоном, необходимостью обеспечения надежного теплового контакта преобразователей с измеряемым объектом, а также эксплуатационными факторами («зарастание» резьбовых соединений из-за возгоров, коррозии и т.п.) затрудняют демонтаж преобразователей для поверки. Вместо этого применяют доступные всевозможные способы проверки работоспособности преобразователей, не демонтируя их, а их погрешность предполагают находящейся в пределах допуска по классу точности.

Методики калибровки и оперативного контроля работоспособности измерительных каналов для реактора БН-600 Белоярской АЭС. В настоящее время признается, что метрологическое обеспечение сложных технических объектов в части поверки (калибровки) средств измерений, встроенных в технические устройства, пойдет по пути разработки специальных поверочных методик, а также использования средств диагностирования измерительных систем как тестовым, так и функциональным способом.

Разработка методики калибровки температурных каналов без демонтажа преобразователей на реакторе БН-600 Белоярской АЭС осуществлялась по принципу информационной избыточности [63]. Она основана на некотором наборе методов статистической обработки экспериментальных данных, получаемых в ходе пассивных экспериментов (под этим подразумевается подробная запись параметров обычных режимов) во время проведения штатных пусков, остановок и работы блока на номинальном уровне мощности.

Методика содержит в себе два способа, объединенных общей задачей.

Первый способ представляет собой собственно калибровку, основанную на использовании в качестве образцового измерительного канала математическую модель в виде так называемого текущего среднего. Для этого используется связка методов статистической обработки экспериментальных данных, которая позволяет получить для некоторых штатных режимов работы блока, например в период промывки испарителей, математическую модель, достаточно устойчивую к внешним возмущениям и временным трендам. Итерационная процедура отбора каналов, показания которых используются для формирования модели в виде текущего среднего, предусматривает использование также и метрологических показателей. Эти нормативные показатели оперативно вводятся в методику по запросуверяющего, чем достигается ее универсальность в подстройке под требования предприятия к процедуре калибровки. Физическое обоснование метода и технология построения математических моделей в виде текущего среднего содержатся в работе [63].

Выходом калибровки являются численные значения отклонений показаний от образцового канала для всех каналов, включенных в систему контроля, вероятности выхода за допустимые отклонения, а также другие данные, полезные для анализа технического состояния преобразователей. Эти результаты могут быть получены в текстовом (табличном) и графическом видах (график отклонений от текущего среднего для каждого канала, величины и знаки трендов и т.д.).

Следует иметь в виду, что в качестве исходной нормы допустимых отклонений в программу введены данные для первичного термпреобразователя. Для измерительных каналов в целом они будут больше (на период разработки методики они не были известны). Поэтому окончательный вывод о результатах процедуры калибровки можно сделать, используя для этой цели метрологические характеристикиверяемых каналов и данные по средним отклонениям их показаний от образцового канала. Если данные по допустимым

отклонениям для каналов ввести в программу, то участие метрологов в процедуре калибровки таким способом сводится к контролю за ее работой и квалифицированному анализу результатов.

Второй способ, включенный в методику, применяется для оперативного контроля над сохранением метрологических характеристик измерительных каналов. В нем используются разработки, основанные на методе парных регрессий. Способ основан на существующих функциональных связях между параметрами. Контроль преобразователей (измерительных каналов) предполагает знание этих связей хотя бы на качественном уровне. Предполагая, что в течение некоторого времени эти связи не меняются, или, в противном случае, применяя приемы тестирования (возможно более точного воспроизведения) режимов работы установки, их используют для решения задач оперативного контроля над сохранением метрологических характеристик измерительных каналов.

Функциональные зависимости в показаниях отдельных преобразователей используют в виде регрессий (эталонных математических моделей), связывающих попарно показания всех преобразователей в группах между собой. Набор преобразователей в группы проводится на основе формального (статистического) и неформального анализов. Параметры эталонных математических моделей получают по обучающей выборке, формируемой из экспериментальных данных. В принципе таких выборок может быть несколько, при этом для каждой выборки должен быть свой режим (работа с полным составом оборудования, неполным и т.д.). Последние представляют собой запись показаний измерительных каналов, выполненную непосредственно после того, как они прошли калибровку в начале микрокампании.

Контроль работоспособности каналов выполняется в процессе эксплуатации блока в любом режиме его работы, если он реализован в обучающей выборке. При этом предусмотрено дублирование выводов об исправном (неисправном) канале, как по количеству опросов, так и по числу датчиков, используемых в методе парных регрессий в качестве факторов в эталонных математических моделях (аналоге образцовых каналов). Результат контроля это вектор-ситуации, которые являются подобиями оценок вероятностей выхода контролируемого канала за доверительные границы с любым заранее заданным уровнем значимости.

Полная методика включает в себя две независимые специализированные программы (одну для калибровки, другую для оперативного контроля работоспособности), которые разработаны для ПЭВМ в операционной системой Windows. Методика калибровки была

согласована Государственным атомным надзором РФ. Отработка методики проходила сначала на экспериментальных данных, полученных на стендах ГНЦ РФ — ФЭИ, а затем на реакторе БН-600, данные которого представляли собой показания каналов измерения температур натрия на выходе из ТВС: обрабатывались текущие данные, поступившие в течение микрокампании от групп из 14, 15 и 18 преобразователей температуры первого контура. При этом выявлялись и устранялись недостатки программного обеспечения, а также проверялась возможность применения данной методики для калибровки и оперативного контроля работоспособности других каналов, используемых для измерения параметров блока.

Основным нормативным документом при выборе величины допустимых отклонений служил ГОСТ Р 50431—92, «Термопары. Часть I. Номинальные статические характеристики преобразования». Условия апробации методики были жесткими, так как в расчет принималась лишь допустимая погрешность первичного преобразователя (исключалось влияние усилителей, линий связи и пр.). Но даже в этом случае методическая составляющая общей величины допустимых отклонений не превышала, как правило, 10—15 %. При этом основную ее долю формировал младший значащий разряд аналого-цифрового преобразователя, который в большинстве данных Белоярской АЭС был высок (0,8 °С). Таким образом, увеличение допустимых отклонений за счет методической составляющей, определяемой шумами измерительных каналов, участвующих в формировании текущего среднего, составляло лишь примерно 2—5 % полной величины допустимых отклонений.

Апробация методики на данных реактора БН-600 показала, что процедуру калибровки можно применять, по меньшей мере, еще к 14 каналам измерения температуры натрия в первом контуре. Это означает, что практически весь набор температурных каналов первого контура может проходить метрологический контроль без демонтажа первичных преобразователей, а для оперативного контроля над работоспособностью она подходит как минимум еще к 12 каналам.

Результаты специального тестирования и апробации на экспериментальных данных реактора БН-600 показали, что разработанные для Белоярской АЭС алгоритмы калибровки и контроля работоспособности каналов СВРК без демонтажа термопреобразователя после коррекции могут быть использованы на АЭС других типов.

Контрольные вопросы

1. Какие средства используются для измерений температуры различных узлов реакторных установок?
2. Каковы особенности измерений температуры тепловыделяющих элементов?
3. В чем состоят особенности измерений температуры узлов реакторов типа ВВЭР?
4. В чем состоят особенности измерений температуры узлов реакторов типа РБМК?
5. В чем состоят особенности измерений температуры узлов реактора БН-600?
6. В чем состоят особенности измерений температуры узлов исследовательских реакторов?
7. Опишите технические основы обеспечения точности температурного контроля на реакторных установках.
8. Поясните методы поверки (калибровки) средств измерений температуры узлов реакторных установок.
9. Охарактеризуйте бездемонтажные методы поверки (калибровки) узлов реакторных установок.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВКАХ

Прогресс в реакторной термометрии, также как и в другой термометрии, возможен на базе создания новых методов и средств измерения температуры. Рассмотрим некоторые из них.

Температурный контроль с помощью измерения дифракции нейтронов. Метод основан на измерении параметров кристаллической решетки металла, зависящих от температуры. К этим параметрам относится расстояние между кристаллическими плоскостями конструкционного материала. Особенностью метода является отсутствие механического и теплового контакта между объектом измерения и пучком нейтронов. Это позволяет измерять температуру движущихся (вращающихся) узлов различного оборудования. Изменение температуры влияет на положение нейтронного дифракционного пика и на его интенсивность.

Такой вид температурного контроля был опробован на модели — диске из сплава состава Ni — 58, Cr — 19,5, Co — 13,5, Mo — 4,3, Al — 1,3 % масс., вращающемся со скоростью 3 тыс. об/мин.

Эксперименты показали, что наибольшая точность определения температуры достигается при измерениях, связанных с определением напряженного состояния, но не интенсивности дифракционного пика. Достигнутая таким образом погрешность определения температуры составила ± 6 К; она практически совпадает с погрешностью определения температуры с помощью хромель-алюмелевой температуры.

Метод опробован на объекте, не имеющем непосредственного отношения к ядерным установкам. Однако он иллюстрирует возможности ядерных методов для измерения температуры. Ядерный метод измерения (оценки) температуры может быть использован для измерения температуры экспериментальных внутриреакторных устройств и материалов, поведение которых исследуется в условиях облучения в реакторе.

Новые термоэлектрические пары. В настоящее время продолжают поиски новых термоэлектродных материалов, обладающих

лучшими свойствами и метрологическими характеристиками, чем известные.

Одной из перспективных является термоэлектрическая пара золото—платина из материалов высокой чистоты. Их погрешность оценивается в $\pm(0,05 \div 0,1)$ °С в интервале температур 0—1000 °С. Стоимость этой пары ниже, чем стоимость платиновых термопреобразователей сопротивления.

Другой термоэлектрической парой является пара из чистых платины и палладия. Погрешность пары в интервале температур 600—1200 °С оценивается в $\pm 0,2$ °С.

Эти термоэлектрические пары были известны и ранее. Однако в последнее время было показано, что перспективно применение именно чистых металлов и в уточненном температурном диапазоне.

По понятным причинам применение этих пар в условиях активной зоны реактора невозможно, однако для измерения температуры вне зоны их использование вполне допустимо и, по-видимому, перспективно.

Шумовая термометрия. Шумовые термометры [64] в меньшей степени, чем другие типы преобразователей, подвержены влиянию эксплуатационных условий, в частности облучения.

Основой шумовой термометрии является формула Найквиста:

$$dU^2/d\nu = 4hR\nu(\exp hv/kT - 1)^{-1}.$$

При достаточно высоких температурах, когда $h\nu \ll kT$ (что имеет место во всех практических случаях) спектральную плотность теплового шума U^2 можно определить по формуле

$$U^2 = 4RkT\nu,$$

где R — сопротивление чувствительного элемента; ν — частота; T — температура; h — постоянная Планка; k — постоянная Больцмана.

Несмотря на простоту соотношений, реализация шумового термометра затруднительна из-за проблемы точного измерения весьма малых падений напряжений. Для таких измерений разработаны схемы, в которых не требуется измерять сопротивление чувствительного элемента. Это особенно важно для измерения в условиях облучения, когда сопротивление может изменяться под воздействием облучения. В этом случае измеряется отношение изменения сопротивления под воздействием температуры и самого сопротивления.

В качестве материала чувствительного элемента могут быть выбраны чистые металлы и их сплавы.

Шумовые термометры целесообразно использовать для измерения очень низкой или очень высокой температуры. При этом погрешность измерения по оценке составляет сотые доли кельвина. Однако приборное исполнение шумового термометра оказывается довольно сложным. Поэтому предпринимавшиеся попытки создания термометра для измерения температуры в активной зоне ядерного реактора пока еще не привели к успеху.

Ультразвуковая термометрия. Принцип действия ультразвуковых (акустических) термометров основан на зависимости от температуры скорости распространения звука в средах различного фазового состояния. Чувствительным элементом может быть твердое, жидкое или газообразное вещество.

Скорость распространения звука v в жидкостях и газах определяется соотношением

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E — модуль упругости; ρ — плотность среды.

Для идеального газа это выражение преобразуется в соотношение

$$v^2 = \gamma RT/M,$$

где $\gamma = C_p/C_v$; M — молекулярная масса газа; C_p и C_v — теплоемкости при постоянных давлении и объеме соответственно; R — универсальная газовая постоянная; T — температура, К.

Для твердого тела скорость распространения продольных волн определяется формулой

$$v_{\parallel} = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}},$$

где E — модуль упругости; σ — коэффициент Пуассона.

Для тонкого стержня скорость распространения продольных волн вычисляется

$$v_{\parallel} = \sqrt{\frac{E}{\rho}}.$$

Параметром, зависящим от температуры, является модуль упругости материала. Излучение и прием ультразвуковых сигналов обычно осуществляется пьезоэлектрическими (для высоких частот) или магнитострикционными (для низких частот) преобразователями.

Ультразвуковой термометр с молибденовым и ренийевым чувствительными элементами успешно применялся для измерения температуры в интервале 210—1500 °С и даже до 2760 °С. В качестве чув-

ствительного элемента могут быть использованы также вольфрам, сапфир, иридий, рутений, конструктивные элементы установки.

В докладе [65] описана разработка ультразвукового термометра для измерения температуры на выходе из активной зоны реактора с натриевым теплоносителем. Действие термометра основано на зависимости скорости звука в жидком натрии от температуры:

$$v \text{ (м/с)} = 2577,25 - 0,524t \text{ (}^{\circ}\text{C)}.$$

Скорость звука определялась, как разность времени между двумя эхоимпульсами, один — из фронта устройства, другой — от задней стенки устройства. Схема одного из устройств приведена на рис. 5.1. Ультразвуковой метод позволяет проводить до 400 измерений в секунду. Экспериментальная проверка осуществлялась на неподвижном и протекающем натрии в интервале температур 250—600 °С. Результаты сравнения температур натрия, измеренных термопарой и ультразвуковым методом, приведены на рис. 5.2 и 5.3. Имеется удовлетворительное совпадение этих температур.

Ультразвуковой метод может быть использован для измерения температуры внутренней стенки технологических каналов в остановленном ядерном реакторе типа РБМК. Измерение температуры в этом случае производится для определения значения зазора между каналом и графитовой кладкой. Чувствительным элементом является металл стенки канала [66]. В докладе [67] описана разработка ультразвукового томографа для измерения температуры выхода натриевого теплоносителя из активной зоны быстрого реактора.

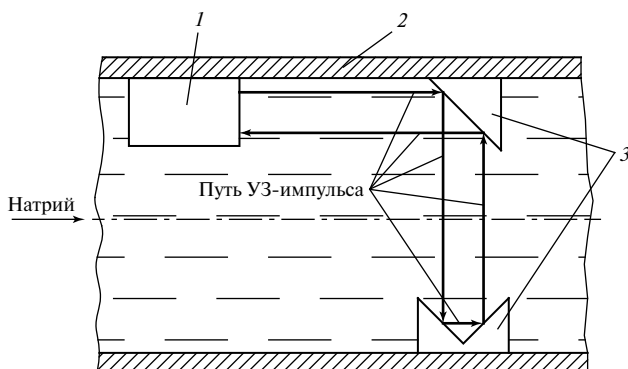


Рис. 5.1. Схема ультразвукового измерителя температуры в натрии:
1 — излучатель ультразвука; 2 — трубопровод; 3 — отражатели

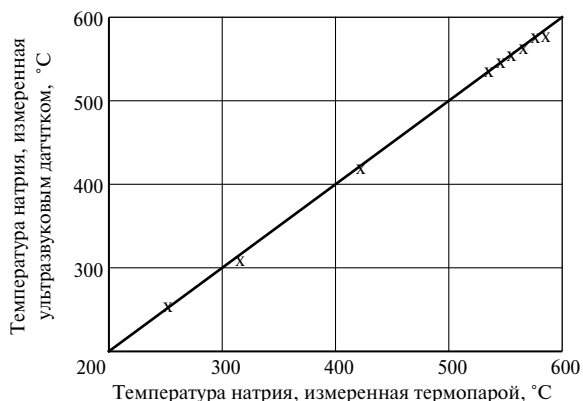


Рис. 5.2. Сравнение результатов измерения температуры статичного натрия термопарой и ультразвуковым датчиком

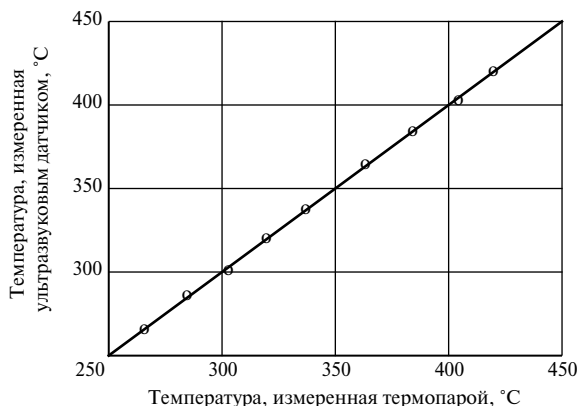


Рис. 5.3. Сравнение температуры потока натрия, измеренной термопарой и ультразвуковым датчиком

В [1] упоминается об измерении ультразвуковым методом температуры около 2000 °C внутри реактора в течение 2000 ч. Там же приводятся данные о применении в ядерном реакторе резонансного метода измерения температуры 1270 К. Резонатор представлял собою полость длиной 250 мм, заполненную гелием при давлении 20 МПа. Погрешность измерения температуры не превышала 10 К. Однако считается, что более перспективными для ядерных реакторов являются резонаторы из тугоплавких металлов и сплавов.

Волоконно-оптическая техника в атомной энергетике. В атомной энергетике волоконно-оптическая техника может быть использована

- в линиях связи в системах управления технологическими процессами атомной электростанции;
- в виде преобразователей различных параметров (температуры, давления, расхода пара, параметров вибрации и перемещения, параметров водно-химического режима, параметров радиационных полей и т.п.) теплоносителя и оборудования АЭС.

Волоконно-оптическая техника предоставляет уникальные возможности для создания высоконадежных и высокоточных преобразователей различных параметров АЭС как в штатных, так и в аварийных условиях работы. Эти возможности основаны на абсолютной устойчивости волоконно-оптической техники к электромагнитным помехам, включая электромагнитные импульсы большой мощности. Наиболее надежно параметры экспериментальных ядерных взрывов, сопровождающихся мощнейшими электромагнитными импульсами, измерялись именно с помощью волоконно-оптической техники. К преимуществам волоконно-оптических преобразователей относятся также малые массогабаритные показатели, гальваническая развязка, высокая точность и чувствительность, быстроедействие и другие метрологические характеристики, а также высокая механическая прочность, абсолютная пожаро- и взрывобезопасность, общая технологическая база для датчиков различных типов, невозможность несанкционированного съема информации [68].

Вопросам создания информационно-измерительных систем на основе волоконно-оптической техники в мире уделяется огромное внимание. Уже в 1985 г. были разработаны различные типы волоконно-оптических преобразователей для измерения более 60 параметров.

В атомной энергетике применение волоконно-оптических преобразователей может способствовать существенному повышению безопасности и надежности эксплуатации оборудования. Например, при возникновении аварии, связанной с разгерметизацией первого контура и истечением смеси пара и водорода под защитную оболочку (контейнмент), необходимо надежно контролировать процессы, протекающие под оболочкой, для чего нужно измерять температуру, давление и влажность среды под оболочкой. Волоконно-оптические преобразователи дают возможность проводить эти измерения наиболее безопасным способом. Они не являются заметными источниками выделения энергии в зоне измерения в отличие от электрических методов измерения и не могут вызвать взрыв скопившегося

под оболочкой водорода в том случае, если его содержание превысит взрывоопасную концентрацию. Кроме того, эти преобразователи, нечувствительны практически к любым по мощности и виду электромагнитным помехам, что позволяет проводить эти измерения надежно и получать достоверную информацию о развивающихся процессах под защитной оболочкой реактора.

Применение волоконно-оптических преобразователей в штатных условиях работы АЭС также способствует существенному повышению надежности эксплуатации, так как резко снижается интенсивность сбоев в работе измерительных систем вследствие их нечувствительности к электромагнитным помехам. Кроме того, применением волоконно-оптических преобразователей обеспечивается альтернативность измерения важных для безопасности параметров, требуемая международными и российскими нормативными документами, в частности, ОПБ-88/97.

Для применения в линиях связи вне радиационных полей не встает проблема подбора радиационно-стойких элементов волоконно-оптической техники. Для применения оптического волокна и оптических элементов преобразователей параметров для активной зоны ядерного реактора или в условиях интенсивных радиационных полей эта проблема становится одной из главных.

Обычные германосиликатные стекла не пригодны для использования при облучении из-за чрезмерно большого наведенного облучением поглощения светового потока. Поэтому необходима разработка радиационно-стойких оптических волокон. Одним из перспективных материалов для этих целей является кварцевое стекло.

В табл. 5.1 приведены данные о радиационной стойкости некоторых типов кварцевых волокон. Авторы работы [69] сообщают, что определенные типы волокон с сердцевинной из синтетического кварца высокой чистоты обладают отличной радиационной стойкостью при больших мощностях дозы облучения. Однако для каждого конкретного случая применения необходимо выбирать волокна с характеристиками, наиболее благоприятными именно для этого случая. Перспективен также переход на большие длины волн. В работе [69] приведен перечень некоторых возможных методов повышения радиационной стойкости оптических волокон (табл. 5.2). Из приведенных в таблице методов особое внимание привлекают фотоотжиг и термический отжиг.

Термический отжиг наиболее эффективен в непосредственной близости к температуре фазовых переходов материала волокна. Например, при температуре, близкой к температуре плавления

Таблица 5.1

Радиационная стойкость кварцевых волокон

Тип световода	Параметры облучения
Одномодовые световоды (1,3 и 1,35 мкм)	До 1 МГр. До 2 кГр/ч (10 кгр/ч)
Многомодовые световоды	До 1 МГр. До 10 МГр/ч

Таблица 5.2

Методы повышения радиационной стойкости оптических волокон

Внутренние	Внешние
Выбор основы стекла	Предварительное облучение волокна
Очистка и стехиометрический контроль	Фотоотжиг
Метод получения стекла	Термический отжиг
Применение присадок	Оптическая фильтрация
Выбор и контроль условий вытягивания стекла	Экранирование

стекла, практически отсутствует образование и накопление радиационных дефектов при поглощенных дозах в десятки и сотни мегарад. Однако такой способ обеспечения радиационной стойкости практически не приемлем, так как температура плавления кварца составляет около 1470 °С.

Перспективным может быть фотоотжиг, но и в этом случае для достижения значимого эффекта необходимы удельные мощности потока фотонов за счет собственных сцинтилляций более 1000 Вт/см², что трудно достижимо на практике. При использовании лазерного излучения на волне 441 нм поток может быть уменьшен до 100 Вт/см², однако и этот поток достаточно велик и реализация его на практике вызывает серьезные затруднения. Выход из этого затруднения может быть найден в следующем.

Экспериментально показано, что, если в процессе облучения волокно одновременно подвергать влиянию фотоотжига и термического отжига, то их параметры можно существенно снизить [69]. Так, было обнаружено, что, если осуществлять термический отжиг при температуре $T_{от} = (0,45 \div 0,5)T_{пл}$ для неорганических материалов и при $T_{от} = (0,7 \div 0,75)T_{пл}$ для органических материалов, то бездефектное состояние оптического волокна в условиях облучения достига-

ется при удельных мощностях потока фотонов, на 3—4 десятичных порядка меньших значений, указанных выше. Оценочные расчеты показывают, что при увеличении отдельно температуры или светового потока можно еще более снизить соответственно величины светового потока или температуры. При этом нужно иметь в виду, что при пропускании значительных потоков фотонов оптические волокна могут разогреваться до заметных температур из-за поглощения фотонов в волокне. В этом случае может отпасть необходимость в специальном подогреве оптического волокна.

Таким образом, открывается перспектива применения оптических волокон в условиях радиоактивного облучения, в том числе, в активной зоне ядерного реактора.

Приведенные выше экспериментальные данные получены при достаточно умеренных значениях радиационных нагрузок. Так, данные по влиянию нейтронного облучения ограничены значением флюенса нейтронов 10^{19} н/см² (без указания энергии нейтронов). Для сравнения вспомним, что для термоэлектрических преобразователей температуры градуировки хромель-алюмель критическое значение флюенса нейтронов, выше которого следует ожидать резкого ухудшения метрологических характеристик, составляет около 10^{22} н/см². Время, за которое может быть набран этот флюенс — несколько лет, реальное с технической точки зрения.

Данные по совместному влиянию фото- и термического отжига проверены при небольшом времени работы волокна — не более сотен суток. Поэтому необходимо проведение исследований для установления предельных, критических значений параметров, характеризующих интенсивность облучения, а также параметров отжига, при которых сохраняется бездефектный режим работы оптического волокна. Важно также в зависимости от конкретных условий обосновать выбор оптимального соотношения параметров фото- и термического отжига, выбрать волну, на которой поглощение светового потока вследствие облучения наименьшее. Следует отметить, что проведение фотоотжига не мешает исполнению основных функций волоконно-оптических датчиков.

Влияние облучения может быть также скомпенсировано конструктивными приемами. Например, поглощение светового потока в оптическом волокне может быть учтено, если рядом с «рабочим» волокном разместить «холостой» участок волокна, в той же степени подвергаемый влиянию облучения, как и «рабочее» волокно. Поглощение света в «холостом» участке может быть прямо измерено, его

величина может быть отнесена к «рабочему» волокну. Наконец, в принципе возможно применение не амплитудных методов измерения параметров, а, например, по фазовому сдвигу световой волны. Такие методы менее чувствительны к поглощению светового потока, если, конечно, световой поток в рабочем диапазоне длин волн не упадет до значений ниже предела обнаружения.

Методы измерения температуры волоконно-оптическими датчиками весьма разнообразны. Примером может служить высокотемпературный датчик температуры с сапфировым световодом [68]. Принцип его работы заключается в следующем.

На рабочий конец (чувствительный элемент) сапфирового стержня или волокна наносят отражающее покрытие, образующее полость с оптическими свойствами, близкими к абсолютно черному телу. Излучение чувствительного элемента передается по сапфировому стержню (волокну) к приемнику излучения. Опыт показал, что наибольшая точность измерения температуры может быть получена при работе по методу спектральных отношений. Такой датчик сочетает в себе преимущества контактного датчика (термопары или термопреобразователя сопротивления) и пирометра излучения. Вместе с тем, он свободен от недостатков, присущих каждому из этих типов датчиков. Он не имеет таких недостатков пирометров, как влияние излучательной способности объекта и поглощающих свойств промежуточной среды. Так, по оценкам он обладает чувствительностью, составляющей десятые и сотые доли градуса при измерении температуры на уровне 1000 °С, которая недоступна термоэлектрическим преобразователям или преобразователям сопротивления. Погрешность измерения температуры по оценкам на этом уровне температур составляет ориентировочно 1—2 °С.

Контрольные вопросы

1. Дайте основные понятия шумовой термометрии.
2. Поясните методы контроля температуры с помощью ультразвуковых приборов.
3. Опишите функции волоконно-оптической техники в атомной энергетике.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Температура является важным параметром, характеризующим эффективность и безопасность работы ядерного реактора. Температурный контроль реакторных установок имеет большое значение для экономической эксплуатации установок. В настоящее время накоплен значительный опыт эксплуатации систем температурного контроля на реакторных установках различных типов и назначений.

Условием эффективности работы преобразователей температуры, установленных на ядерном реакторе, является учет всех причин, вызывающих изменение их метрологических характеристик во время эксплуатации.

Для выполнения этих условий необходимо следовать положениям о метрологическом обеспечении температурного контроля. Метрологическое обеспечение понимается как установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

Таким образом, составляющими разделами понятия о метрологическом обеспечении являются:

- законодательно-правовое;
- организационное;
- научное;
- техническое.

Законодательно-правовое обеспечение составляют законы Российской Федерации, Государственные стандарты, стандарты предприятий, а также правила, нормы и рекомендации, разрабатываемые Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (ФАТРИМ). Важнейшим законодательным актом в области метрологии является Закон РФ «Об обеспечении единства измерений», а важнейшим положением этого Закона — понятие о единстве измерений. Это понятие гласит, что «единство измерений — состояние измерений, при котором их результаты выражены в допущенных к применению в Российской Федерации единицах величин, а показатели точности измерений не выходят за установленные границы».

Организационное обеспечение в стране во всех областях измерений осуществляется под общим контролем ФАТРИМ. Это обеспечение осуществляется так же и на более низких уровнях. Так, в Госу-

дарственной корпорации по атомной энергии (ГК «Росатом») организована Служба главного метролога, решающая задачи в области обеспечения единства измерений, в том числе в области обеспечения безопасности и экологии радиационно-опасных производств, к которым относят также и атомные электростанции. Предприятия, входящие в систему ГК «Росатом», имеют свои метрологические службы. На атомных станциях учреждена Служба главного метролога, подчиняющаяся непосредственно директору станции.

Техническое обеспечение применительно к реакторным установкам, в том числе к атомным станциям, заключается в применении средств измерений температуры, максимально учитывающих специфику работы на этих установках. Так, для измерения температуры узлов и теплоносителя в активных зонах энергетических реакторных установках типа ВВЭР, РБМК, БН применяются исключительно преобразователи температуры градуировки хромель-алюмель. Преобразователи только этого типа имеют метрологические характеристики, наиболее удовлетворяющие требованиям работы в этих условиях. Вне активной зоны, в контурах теплоносителя, в устройствах компенсации температуры холодных спаев термоэлектрических преобразователей, не подвергающиеся воздействию сильного облучения, используются также платиновые термопреобразователи сопротивления имеющие меньшую погрешность измерения температуры.

К научному обеспечению относятся вопросы обеспечения необходимой точности измерения температуры. Эта точность обеспечивается выбором соответствующих средств измерений температуры, процедурами их поверки или калибровки, периодически проводимыми через определенный промежуток времени, называемый межповерочным интервалом, диагностическими мероприятиями. Эти процедуры проводятся метрологическими подразделениями атомных электростанций. Однако поверка или калибровка термоэлектрических преобразователей температуры, эксплуатирующихся в активной зоне реакторной установки, весьма затруднительна из-за их сильной активации. В этом случае прибегают к градуировке преобразователей в «квазистационарном» режиме работы реакторной установки, достигаемом в режиме горячей обкатки установки. Предпринимаются попытки создания так называемой методики бездемонтажной поверки (калибровки) преобразователей. Опыт указывает на перспективность поисков таких методов.

Приведенные в пособии описания средств температурного контроля на реакторных установках различных типов показывают, что в настоящее время сохраняется и даже нарастает тенденция макси-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

мального оснащения активных зон энергетических реакторов средствами измерения температуры и других параметров, контролирующих условия работы активных зон: датчиками энерговыделения и датчиками уровня теплоносителя в зоне.

Перспектива создания более совершенных средств измерений температуры и других параметров в реакторных установках видится в применении средств волоконно-оптической техники, методов шумовой термометрии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Лысыков Б.В., Прозоров В.К.** Реакторная термометрия. М.: Атомиздат, 1980.
2. **Лысыков Б.В., Прозоров В.К.** Термометрия и расходомерия ядерных реакторов. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. **Рогельберг И.Л., Бейлин В.М.** Сплавы для термопар. М.: Metallurgia, 1983.
4. **Шевченко В.М.** Метрологическое обеспечение измерений на атомных станциях // Мир измерений. 2004. № 7.
5. **Шейнкман А.Г.** Развитие систем диагностики процессов и оборудования энергоблока с реактором БН-600. Екатеринбург: УрО РАН, 1994.
6. **Kebadze B.V.** LMFBFR core monitoring by means of temperature noise // Specialist meeting on instrumentation for supervision of core cooling in FBRs. 1989. IAEA. India Gandhi Centre for atomic research. Kalpakam, 1989.
7. **Состояние** и пути совершенствования температурных измерений в Минатоме РФ / М.И. Солонин, И.И. Федик, В.П. Денискин и др. // Сб. докладов II Всероссийской научно-технической конференции 31 мая — 5 июня 2004 г., г. Пенза. «Датчики и детекторы для АЭС «ДДАЭС-2004». 2004.
8. **Ткачук Ю.Г., Титов Г.В.** Состояние и проблемы метрологического обеспечения измерений в Министерстве Российской Федерации по атомной энергии / / Сб. докладов II Всероссийской научно-технической конференции 31 мая — 5 июня 2004 г., г. Пенза. «Датчики и детекторы для АЭС «ДДАЭС-2004». 2004.
9. **Preston-Thomas H.** The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90)/ Metrologia. 1990. V. 27.
10. **Минашин В.Е., Субботин В.И., Шолохов А.А.** Применение микротермопар в исследованиях теплопередачи. Вопросы теплообмена. М.: Атомиздат, 1959.
11. **Иванова А.Г., Тартаковский Д.Ф.** О стабильности технических термометров сопротивления. Исследования в области тепловых измерений // Тр. метрологических институтов СССР. 1969. Вып. 111(171).
12. **Трофимов А.И.** Приборы и системы контроля ядерных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1999.
13. **Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С.** Теплотехнические измерения и приборы. М.: Изд-во МЭИ, 2005.
14. **Системы** внутриреакторного контроля АЭС с реакторами ВВЭР / В.А. Брагин, И.В. Батенин, М.Н. Голованов и др. М.: Энергоатомиздат, 1987.
15. **Сулаберидзе В.Ш.** Введение в теорию и практику измерений: уч. пособие. Дмитровград: УлГТУ, 2003.
16. **Харитонов Н.П., Кривцов В.А.** Органосиликатные материалы в теплофизических покрытиях. Л.: Наука, 1975.

17. **Температурные** измерения: справочник / О.А. Герашенко, А.Н. Гордов, А.К. Еремина и др. Киев: Наукова думка, 1989.
18. **Гордов А.Н., Жагулло О.М., Иванова А.Г.** Основы температурных измерений. М.: Энергоатомиздат, 1992.
19. **Сергеев А.Г., Крохин В.В.** Метрология. М.: Логос, 2001.
20. **Прокопенко И.Ф., Рыбкин Б.И., Турчанинов В.К.** Оценка долговременной стабильности кабельных ТЭП по экспериментальным данным // Инженерная физика. 2000. № 2.
21. **Рогожина И.В., Кушнир Ю.А.** Метрологические исследования платиновых термометров сопротивления, бывших в эксплуатации 30 лет // Сб. тезисов докладов на Первой Всероссийской конференции по проблемам термометрии «Температура-2001». г. Подольск, НПО «Луч». 2001.
22. **Метрологическое** обеспечение и эксплуатация измерительной техники / Г.П. Богданов, В.А. Кузнецов, Б.А. Лотонов и др. М.: Радио и связь, 1990.
23. **Новый** этап в развитии метрологического обеспечения датчиков / Ю.В. Тарбеев, А.Ю. Кузин, Р.Е. Тайманов и др. // Измерительная техника. 2007. № 3.
24. **Куликов М.В., Макаров Б.И.** Измерение температуры поверхности твердых тел. М.: Энергия, 1979.
25. **Павлов Б.П.** Термоэлектрическая неоднородность электродов термопар. М.: Изд-во стандартов, 1979.
26. **Каржавин В.А.** Влияние термопар на неопределенность теплофизического эксперимента // Сб. трудов XVI Школы-семинара молодых ученых и специалистов «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» / под рук. академика РАН А.И. Леонтьева. Санкт-Петербург: СПбГПУ, 2007.
27. **Bentley R.E.** Irreversible thermoelectric changes in type K and type N thermocouple alloys within Nicrosil-sheathed MIMS cable // Journal of Physics D: Applied Physics. 1989. Vol. 22. № 12.
28. **Rosch W.** Damage of Fine-Diameter Platinum-Sheathed Type R Thermocouples at Temperatures Between 950 and 1100 °C // Proceedings of international symposium «Temperature. It's Measurement and Control in Science and Industry». New York, American institute of physics. 1992. Vol. 6. Part 1.
29. **Burley N.A.** Advanced integrally sheathed type N thermocouple of ultra-high thermoelectric stability // Measurement. 1990. № 1.
30. **ГОСТ Р 52314—2005.** Преобразователи термоэлектрические платиноводород-платиновые и платиноводород-платиноводородные эталонные 1, 2 и 3-го разрядов. Общие технические требования. М.: Изд-во стандартов, 2005.
31. **Hiroyasu SATO.** Development of a thermoelectric scanning system for Type R thermocouples with non pressure controlled heat-pipes // Acta metrologica sinica. 2008. № 29. 4A.
32. **ASTM E220-07a** Standard Test Method for Calibration of Thermocouples By Comparison Techniques. — USA: ASTM International, 2003.
33. **SAE AMS 2750D** Pyrometry: SAE International, 2005.

34. **О метрологической** надежности измерения температуры в ядерных энергетических установках / М.Н. Арнольдов, А.К. Котов, В.А. Острейковский и др. // Атомная энергия. Т. 62. Вып. 1. 1987.
35. **Алексеев С.В., Рыбкин Б.И., Турчанинов В.К.** Прогнозирование изменения термоЭДС кабельных ТЭТ по воздействующим факторам температура—время—вакуум // Приборы и системы. 2001. № 1.
36. **Трофимов М.А.** Методы контроля динамических напряжений в элементах конструкций ЯЭУ. М.: Энергоатомиздат, 2005.
37. **Исследование** совместного влияния вибрации и температуры на градуировку кабельных хромель-алюмелевых преобразователей температуры / М.Н. Арнольдов, А.К. Котов, В.А. Острейковский и др. // Приборы и системы. 2005. № 10.
38. **Васильев Е.В., Наливаев В.И., Олейников П.П.** Методика и оборудование для индивидуальной градуировки температурных преобразователей // Сб. докладов II Всероссийской научно-технической конференции 11—13 сентября 2002 г., г. Пенза. «Датчики и детекторы для АЭС «ДДАЭС-2002». Пенза. 2002.
39. **Земельман М.А.** Метрологические основы технических измерений. М.: Изд-во стандартов, 1991.
40. **Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.** First edition. Switzerland. ISO.
41. **Руководство** по выражению неопределенности измерения: пер. с англ. под науч. ред. проф. В.А. Слаева. Санкт-Петербург: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999.
42. **РМГ 43—2001** ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». М.: ИПК Изд-во стандартов, 2002.
43. **EA-4/02.** Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration. — European co-operation for Accreditation, 1999.
44. **ГОСТ 28498—90.** Термометры жидкостные стеклянные. Общие технические требования. Методы испытаний. М.: Изд-во стандартов, 1990.
45. **ГОСТ 6616—94.** Преобразователи термоэлектрические. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 1998.
46. **РМГ 74—2004.** Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений. М.: Стандартинформ, 2005.
47. **Лысиков Б.В., Прозоров В.К., Фрактовникова А.А.** Контрольный эксперимент по исследованию мгновенных эффектов термоэлектрических преобразователей в условиях реакторов ИВВ-2М // Атомная энергия. 1986. Т. 60. Вып. 1.
48. **Погрешность** измерения температуры теплоносителя в ВВЭР-440 / С.О. Слесаревский, А.М. Белавский, М.Н. Коротченко и др. // Атомная энергия. 1989. Т. 67. Вып. 5.

49. **Олейников П.П., Приймак С.В., Турчанинов В.К.** К экспериментально-расчетной оценке стабильности термоэлектрических преобразователей. // Сб. докладов II Всероссийской научно-технической конференции 11—13 сентября 2002 г., г. Пенза. «Датчики и детекторы для АЭС «ДДАЭС-2002». Пенза, 2002.
50. **Экспериментальная** оценка вероятности безотказной работы ТЭП / В.И. Наливаев, В.С. Никульшин, П.П. Олейников и др. // Сб. докладов II Всероссийской научно-технической конференции 11—13 сентября 2002 г., г. Пенза. «Датчики и детекторы для АЭС «ДДАЭС-2002». Пенза. 2002.
51. **Голуб Е.В.** Метод повышения метрологической надежности системы телеметрии теплоносителя в сечении активной зоны ядерного реактора / Метрологическое обеспечение и стандартизация // Сб. докладов X Всеакадемической школы по проблемам метрологического обеспечения и стандартизации. Минск, 1986.
52. **Саченко А.А., Мильченко В.Ю., Кочан В.В.** Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами. М.: Энергоатомиздат, 1986.
53. **Арнольдов Н.Л., Сальников Н.Л., Филимонов Е.В.** Сравнительный критерий эффективности термометрических систем с избыточностью показаний // Сб. трудов Физико-энергетического института им. А.И. Лейпунского. Сер. Методы и средства измерения теплофизических параметров. Обнинск: ФЭИ, 1990.
54. **Щекотов В.Г.** Конструкция термопары для измерения температуры жидкого металла // Сб. трудов Физико-энергетического института им. А.И. Лейпунского. Сер. Методы и средства измерения теплофизических параметров. Обнинск: ФЭИ, 1990.
55. **Тимонин А.С., Цимбалов С.А.** Качество установки внутриреакторных термопар в каналы ВВЭР // Атомная энергия. 1994. Т. 76. Вып. 3.
56. **Субботин В.И.** Размышления об атомной энергетике. СПб.: РАН ОФТПЭ, 2995.
57. **Канальный** ядерный энергетический реактор РБМК / М.А. Абрамов, В.И. Авдеев, Е.О. Адамов и др. под ред. Ю.М. Черкашова. М.: Изд-во ГУП НИКИЭТ, 2006.
58. **Внутриреакторные** детекторы и их сборки / М.Г. Мительман, В.М. Троценко, А.А. Кононович и др. // Сб. докладов II Всероссийской научно-технической конференции 31 мая — 5 июня 2004 г. Пенза, 2004.
59. **Сулаберидзе В.Ш.** Метрологическое обеспечение исследований на реакторных установках ГНЦ РФ НИИАР // Сб. докладов II Всероссийской научно-технической конференции 31 мая — 5 июня 2004 г. Пенза, 2004.
60. **Филатов Б.В.** Стенд КМ-1. Опыт эксплуатации // Сб. докладов конф. «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях». ГНЦ РФ ФЭИ, 1999. Т. 1.

61. **Сахнин Д.Е., Корнилов А.В.** Контроль температуры в системах управления и защиты реакторов судовых энергетических установок // Тезисы докладов четвертого семинара-совещания по вопросам надежности контроля температуры на АЭС и промышленных предприятиях отрасли. Подольск, НПО «Луч», 1999.
62. **О дрейфе** градуировочных характеристик термоэлектрических преобразователей в реакторных условиях / С.В. Приймак, А.Н. Конотопов, Д.М. Ляхов и др. // Сб. докладов на Всероссийской конференции «Температура-2007». НПО «Луч», 2007.
63. **Богомолов В.Н., Замиусский В.Н., Колесников А.Ф.** Методика калибровки и оперативного контроля работоспособности измерительных каналов СВРКТ без демонтажа термоэлектрических нагревателей // Тезисы докладов четвертого семинара-совещания по вопросам надежности контроля температуры на АЭС и промышленных предприятиях отрасли. Подольск: НПО «Луч», 1999.
64. **Саватеев А.В.** Шумовая термометрия. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1987.
65. **Macleod I.D., Huges G., Monday C.H.** An ultrasonic nechnique for the remote measurement of breeder subassembly outlet temperature // IAEA «Specialist meeting on instrumentation for supervision of core cooling in FBR». Kalpakkam. India, 1989.
66. **Трофимов М.А.** Ультразвуковые термометры для внутриреакторного измерения температуры // Сб. тезисов докладов на Первой Всероссийской конференции по проблемам термометрии «Температура—2001». Подольск: НПО «Луч», 2001.
67. **Oley F., Macleod I.D.** The development of acoustic tomography for temperature measurement in fast reactor // IAEA «Specialist meeting on instrumentation for supervision of core cooling in FBR». Kalpakkam. India, 1989.
68. **Окоси Т.** Волоконно-оптические датчики: пер с японск. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отд-ние, 1990.
69. **Трыков О.А.** Увеличение ресурса прозрачности твердотельных сцинтилирующих и несцинтилирующих сред, облучаемых интенсивными потоками гамма-квантов. Препринт ФЭИ-2482. Обнинск, 1995.

Учебное издание

**Арнольдов Михаил Николаевич
Каржавин Владимир Андреевич
Трофимов Адольф Иванович**

**ОСНОВЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ТЕМПЕРАТУРНОГО КОНТРОЛЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК**

Учебное пособие для вузов

*Редактор Н.Л. Пароева
Художественный редактор А.Ю. Землеруб
Технический редактор Т.А. Дворецкова
Корректор В.В. Сомова
Компьютерная верстка В.В. Пак*

Подписано в печать с оригинала-макета 15.09.11	Формат 60×90/16
Бумага офсетная	Гарнитура Таймс
Усл. печ. л. 15,5	Усл. кр.-отт. 16,5
Тираж 500 экз.	Уч.-изд.л. 15,0
	Заказ

ЗАО «Издательский дом МЭИ», 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14,
тел/факс: (495) 361-1681, адрес в Интернет: <http://www.mpei-publishers.ru>,
электронная почта: info@idmei.ru

Отпечатано в ПЦ МЭИ (ТУ), 111250, Москва, Красноказарменная, д. 13