Туяхов А.И.

Практическая метрология и измерения

Донецк 2002

Министерство образования и науки Украины
Донецкий национальный технический университет

Туяхов А.И.

Практическая метрология и измерения

Рекомендовано Министерством образования и науки Украины в качестве учебного пособия для студентов теплоэнергетических и металлургических специальностей высших учебных заведений Украины

Донецк 2002

ББК

УДК 389.14: 621.1.016.4

Рецензенты:
профессор, доктор технических наук Пилюшенко В.Л.
(Донецкая государственная академия управления)
профессор, доктор технических наук Губарь В.Ф.
(Донецкая государственная академия строительства и архитектуры)

Туяхов А.И. Практическая метрология и измерения. Учебное пособие. – Донецк: РИА ДонНТУ, 2003. – 308 с.

ISBN 996-559-…….

В учебном пособии изложены основные положения практической метрологии и освещаются современные методы и средства измерений, применяемые в тепловых и теплоэнергетических агрегатах и установках. Рассматриваются погрешности измерения, способы их уменьшения, достоинства и недостатки отдельных методов измерений и их применимость для конкретных технологических процессов. Излагаемый в книге материал сопровождается примерами и задачами, приводятся справочные материалы.

Учебное пособие предназначено для студентов специальностей "Промышленная теплотехника" и "Промышленная теплоэнергетика", а также может быть полезно студентам, обучающимся по металлургическим специальностям.

табл. 29, ил. 136, библ. 24, приложений 10.

ISBN 996-559-…….

© Туяхов А.И. 2003

Содержание

Введение…….. 6
1 МЕТРОЛОГИЯ……. 8
1.1 Задачи метрологии…… 8
1.2 Физическая величина…….…….. 11
1.3. Единица физической величины…….. 12
1.4 Правила написания наименований и обозначений единиц…….. 19
1.5 Классификация средств измерений……. 21
1.6 Общие понятия об эталонах……. 23
1.7 Показатели качества средств измерений…… 25
1.8 Погрешности измерений…….. 28
1.9 Метрологические характеристики средств измерения…….. 36
1.10 Подготовка к измерениям……... 42
1.11 Анализ постановки измерительной задачи……... 42
1.12 Создание условий для измерений…….. 43
1.13 Выбор средств и метода измерений…….. 46
2 МЕТРОЛОГИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ……... 49
2.1 Температурные шкалы…….. 49
2.2 Термометры расширения…….. 54
2.3 Манометрические термометры…… 62
2.4 Дилатометрические и биметаллические термометры…….... 66
2.5 Термоэлектрические термометры…… 68
2.6 Способы повышения качества измерения температуры термопарами……... 76
2.7 Конструктивное выполнение термопар…….. 80
2.8 Измерительные приборы, работающие в комплекте с термопарами…….. 87
2.9 Компенсационный метод измерения термо-ЭДС термопары…... 92
2.10 Термометры сопротивления……... 99
2.11 Конструктивное выполнение термометров сопротивления…… 103
2.12 Вторичные приборы для термометров сопротивления……... 104
2.13 Измерение температуры методом оптической пирометрии…... 110
2.14 Пирометры спектрального отношения…….. 118
2.15 Пирометры полного излучения…….. 122
2.16 Перспективные направления в разработке приборов для измерения температуры…….. 125
3 ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКИХ И ГАЗОВЫХ СРЕД…… 129
3.1 Общие сведения…….…… 129
3.2 Жидкостные манометры…….…... 131

3.3 Деформационные манометры…….. 135
3.4 Электрические манометры……... 140
4 ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ГАЗА, ЖИДКОСТИ И ПАРА…… 147
4.1 Общие сведения…… 147
4.2 Расходомеры по перепаду давления в сужающем устройстве…. 148
4.3 Схемы соединительных линий при использовании сужающих устройств…….. 162
4.4 Измерение расхода жидкостей и газов напорными трубками….. 165
4.5 Ультразвуковые расходомеры…….. 170
4.6 Электромагнитные расходомеры……. 175
4.7 Измерение расхода тепла в теплофикационных системах…… 178
4.8 Тахометрические расходомеры…… 181
4.9 Тенденции развития средств измерения расхода……... 185
5 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ……... 188
5.1 Общие сведения…… 1588
5.2 Дифференциально-трансформаторные преобразователи…….. 189
5.3 Преобразователи с магнитной компенсацией…… 192
5.4 Ферродинамические преобразователи…… 193
6 ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ…….. 197
6.1 Общие сведения…… 197
6.2 Визуальные уровнемеры…….. 197
6.3 Гидростатические уровнемеры…… 198
6.4 Поплавковые и буйковые уровнемеры…… 204
6.5 Емкостные уровнемеры……..... 206
6.6 Индуктивные уровнемеры……... 209
6.7 Акустические уровнемеры……... 212
7 АНАЛИЗ СОСТАВА ГАЗОВ…….. 214
7.1 Общие положения…… 214
7.2 Химические газоанализаторы…….. 215
7.3 Тепловые газоанализаторы……... 217
7.4 Магнитные газоанализаторы…… 220
7.5 Оптические газоанализаторы……... 222
7.6 Лазерный газоанализатор…… 226
7.7 Газовые хроматографы…… 228
8 АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВОДЫ, ПАРА И КОНДЕНСАТА……... 234
8.1 Общие положения…… 235
8.2. Электродные кондуктометрические анализаторы…… 235
8.3 Безэлектродные кондуктометры…….. 238
8.4 Потенциометрический метод анализа воды……... 241
8.5 Измерение концентрации газов, содержащихся в воде и паре…. 244

9 ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ…… 250
9.1 Общие положения…… 250
9.2 Психрометрический метод……... 252
9.3 Конденсационный метод измерения влажности…… 253
9.4 Сорбционный метод измерения влажности…… 255
10 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ…… 258
10.1 Общие сведения……... 258
10.2 Измерительные системы…… 261
10.3 Телеизмерительные системы…… 262
10.4 Принцип построения функциональных схем контроля и управления технологическим объектом…… 264
Перечень ссылок…… 273
ПРИЛОЖЕНИЕ А – Коэффициенты распределения Стьюдента…... 275
ПРИЛОЖЕНИЕ Б – Монохроматический коэффициент теплового излучения различных материалов при λ=0,65 мкм… 276
ПРИЛОЖЕНИЕ В – Коэффициент полного теплового излучения (интегральный коэффициент теплового излучения) различных материалов…… 277
ПРИЛОЖЕНИЕ Г – Градуировочная характеристика хромель–копелевой (ХК) термопары в диапазоне температур –50…+800°С……... 279
ПРИЛОЖЕНИЕ Д – Градуировочная характеристика хромель–алюмелевой (ХА) термопары в диапазоне температур –200…+1300°С……... 282
ПРИЛОЖЕНИЕ Е – Градуировочная характеристика платинородий (10 %)–платиновой термопары (ПП) в диапазоне температур 0–1600 °С……... 287
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж – Градуировочная характеристика платинородий (30%) – платинородиевой (6%) термопары (ПР) в диапазоне температур 300…1800°С…….. 292
ПРИЛОЖЕНИЕ З – Градуировочная характеристика вольфрамрений (5 %) – вольфрамрениевой (20 %) термопары (ВР) в диапазоне температур 0…2500°С……. 297
ПРИЛОЖЕНИЕ И – Градуировочная таблица проволочных термометров сопротивления…….. 305
ПРИЛОЖЕНИЕ К – Давление и плотность насыщенных паров воды……... 306

ВВЕДЕНИЕ

Современный человек в течении всей своей жизни постоянно имеет дело с измерениями. Каждый день мы смотрим на часы, определяя и сверяя время с сигналами точного времени, измеряем температуру в квартире и за окном дома, следим за показаниями весов в магазине, метеобюро нам сообщает о температуре, влажности, давлении атмосферного воздуха и даже величину радиационного фона. Производственная деятельность человека также сопровождается многочисленными и многообразными измерениями, без которых невозможно контролировать ход технологического процесса.

Познание окружающего мира, а также повседневный количественный контроль за всеми сторонами человеческой деятельности осуществляется с использованием метода непосредственного измерения тех или иных величин. На важность измерения указывали многие ученые.

Так, Д.И.Менделеев писал: "Наука начинается с тех пор, как начинают измерять; точная наука немыслима без меры". Многие научные исследования сопровождаются измерениями, которые позволяют установить количественные соотношения между различными явлениями окружающего мира и установить закономерности изучаемых явлений.

Прогресс в области измерений всегда способствует новым открытиям, а достижения науки приводят к совершенствованию методов и средств измерений. Разработка новых технологий, получение новых материалов отражаются в характеристиках средств измерений.

В настоящее время в промышленности все большее распространение получают современные средства для измерения различных технологических параметров. Среди них можно выделить следующие основные группы:

- цифровые измерительные приборы и аналого-цифровые преобразователи;
- измерительные преобразователи электрических и неэлектрических величин в электрические сигналы;
- измерительные информационные системы и измерительно-вычислительные комплексы;
- измерительно-вычислительные средства на основе использования микропроцессоров в микро-ЭВМ.

В области метрологического обеспечения перед учеными стоят

следующие задачи:

- совершенствование и опережающее развитие эталонной базы, повышение точности воспроизведения единиц величин, переход на эталоны, основанные на фундаментальных законах природы;
- усовершенствование системы передачи единиц величин к средствам измерений, автоматизация поверочных операций;
- расширение сферы метрологического обеспечения на недостаточно охваченные области измерений;
- развитие общей теории измерений, теории погрешности измерений и др.

По мере развития техники измерения становятся все более сложными, однако, суть измерения, заключающаяся в сопоставлении количественного выражения какой-то физической величины с другой такой же физической величиной, принятой за единицу, остается без изменений.

Основой метрологической деятельности в Украине является обеспечение средства измерения различных физических величин на предприятиях, в учреждениях, в научно-исследовательских и учебных заведениях. Для этого существует государственная и ведомственные метрологические службы, деятельность которых направлена на создание условий, обеспечивающих получение измерений требуемого качества.

1 МЕТРОЛОГИЯ

1.1 Задачи метрологии

Метрология имеет дело с измерениями физических величин и, как наука, базируется на трех постулатах:

- существует истинное значение измеряемой величины;
- истинное значение измерить невозможно;
- истинное значение не изменяется во времени.

Истинное значение измеряемой величины можно сравнить с понятием абсолютной истины, которое познается лишь в результате бесконечного процесса познания. Для каждого исторического этапа познается лишь относительная истина. Истинное значение физической величины также может быть получено только в результате бесконечного процесса измерений с бесконечным совершенствованием методов и средств измерений.

Для каждого уровня развития измерительной техники можно знать только действительные значения физической величины. Понятие истинного значения физической величины необходимо как теоретическая основа развития теории измерений, в частности, при раскрытии понятия "погрешность измерений".

Метрология в ее современном понимании – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Единство измерений базируется на узаконенных единицах измерения, погрешности которых известны с заданной вероятностью. Единство измерений необходимо для того, чтобы можно было сопоставить результаты измерений, выполненных в разных местах в разное время, с использованием разных методов и средств измерений.

Точность измерений характеризуется близостью результатов измерений к истинному значению измеряемой величины.

В настоящее время метрология, как наука, решает следующие задачи:

- расширение номенклатуры физических величин, которые необходимо измерять. Для современного уровня науки и техники требуется измерить более 2000 физических величин, а разработаны методы и средства для измерения около 700 физических величин;
- расширение диапазона измерения для конкретной физической величины. Например, требуется измерить давление от 10^{-10} Па до

$0{,}4 \cdot 10^{10}$ Па, для температуры от 0,001 °С до нескольких миллиардов градусов и т.д.

- требования точности измерений. Уровень точности, к которому надо стремиться, должен определяться критерием целесообразности. Известно, что увеличение точности в два раза удорожает измерения в несколько раз. Однако, снижение точности измерений ниже нормы приводит к браку продукции. От точности результата измерений может зависеть научное открытие (так, точное измерение параметров орбиты планеты Нептун позволило открыть самую дальнюю планету солнечной системы Плутон) или жизнь людей (например, при измерении концентрации метана в шахтах).
- быстрота получения измерительной информации. Измерительные устройства с большим быстродействием позволяют контролировать быстропротекающие процессы, например, процессы сжигания топлива в теплоэнергетических агрегатах, газогидродинамические явления при движении газовых, жидких и паровых сред, как в рабочем пространстве, так и в различных каналах агрегатов.
- разработка бесконтактных методов измерений. Использование таких методов позволяет устанавливать измерительные устройства на достаточном расстоянии от объекта и устранить агрессивное (химическое, тепловое, механическое и др.) воздействие объекта на измерительное устройство. С другой стороны, измерительное устройство не воздействует на объект и не изменяет его параметры.
- разработка интеллектуальных датчиков и измерительных роботов. Такие устройства базируются на основе микропроцессорной техники и позволяют в автоматическом режиме вводить корректирующие поправки, учитывающие влияние различных факторов на точность измерения, изменять диапазоны измерения и другие функции.
- требования высокой квалификации операторов. Возрастающее количество новых средств и методов измерения физических величин, усложнение конструкции этих средств и увеличение их функциональных возможностей требует высококвалифицированных специалистов в области точных измерений.

Метрологию, как область человеческой деятельности, можно разделить на теоретическую, законодательную и практическую.

Началом организованной и законодательной деятельности государств в области метрологии следует считать 1875 год, когда в Париже 17-ю государствами, в том числе и Россией, была подписана Метрическая конвенция для обеспечения международного единства и усовершенствования метрической системы мер. В это же время была соз-

дана координирующая организация – Международное бюро мер и весов, где хранятся международные прототипы мер (метра и килограмма), международные эталоны электрических и световых единиц и радиоактивности. Эта организация выполняет международные сличения национальных эталонов длины, массы, электродвижущей силы, электрического сопротивления, силы света, светового потока, источника ионизирующих излучений, а также производит сличения отдельных международных образцовых мер.

В Украине создана эталонная база, которая насчитывает более 150 государственных эталонов, а также несколько сот вторичных эталонов. В областных центрах существует большой парк образцовых средств измерений, связанных с эталонами.

Государственную поверочную систему можно упрощенно представить на схеме (рисунок 1.1), где от одного исходного начала – государственного эталона единицы какой – либо физической величины распространяется при помощи вторичных эталонов и образцовых средств измерений всем рабочим средствам измерений. Следовательно, государственные эталоны являются основой обеспечения единства измерений.

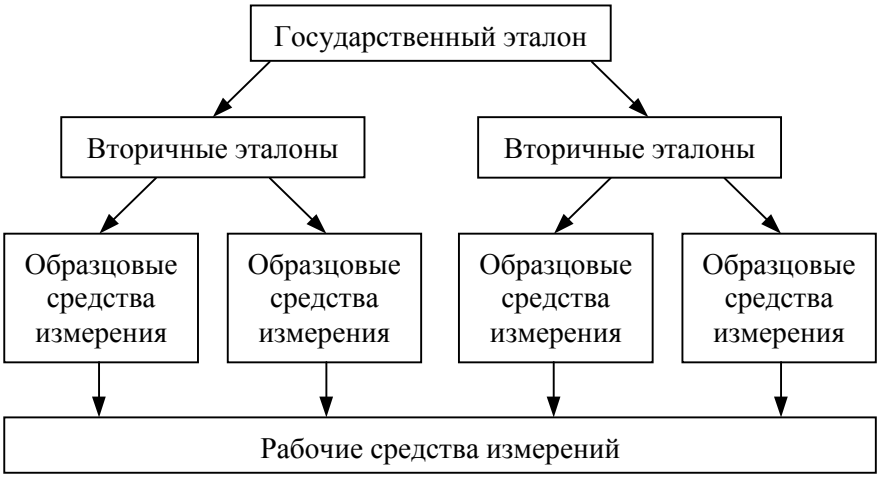


Рисунок 1.1 – Схема государственной поверочной системы единиц измерений.

На каждом предприятии, где достаточное количество технологического оборудования и необходимо контролировать большое разнообразие физических величин, создана метрологическая служба, в за-

дачу которой входит:

- заказывать необходимые средства измерения для различных технологических объектов предприятия;
- осуществлять непрерывный контроль и поверку всей измерительной техники на предприятии;
- осуществлять приемку новых систем измерительной техники;
- непрерывное повышение квалификации операторов, обслуживающих сложные измерительные системы и комплексы.

1.2 Физическая величина

Материальный мир в виде физической системы обычно описывается заданием значений многих физических величин. Так, при определении основных термодинамических характеристик любой газовой среды измеряется температура, давление, энтальпия, энтропия и другие физические величины.

Метрология имеет дело с измеримыми физическими величинами, присущими конкретным предметам, явлениям, процессам. В понятие "измерение" входят такие главные признаки:

- измерять можно свойства реально существующих объектов познания, т.е. физические величины,
- измерение требует проведение опытов, т.е. теоретические рассуждения или расчёты не могут заменить эксперимент;
- для проведения опытов требуются особые технические средства - "средства измерений", приводимые во взаимодействия с материальным объектом;
- результатом измерения является значение физической величины.

Количественная оценка измеряемой величины должна быть обязательно именованным числом, то есть результат измерения должен быть выражен в определённых единицах, принятых для данной величины. Только в этом случае результаты измерений, полученные различными средствами и разными экспериментаторами, сопоставимы.

Результат измерения всегда отличается от истинного значения физической величины, которое, согласно метрологическому постулату, определить невозможно. В результате измерений получают значение физической величины, близкое к истинному, которое называют действительным значением физической величины или действительное значение. Оно определяется экспериментальным путём и настолько близко к истинному значению, что для поставленной измерительной задачи оно может его заменить. За действительное значение при мно-

гократных измерениях принимают среднее арифметическое значение, а при однократных измерениях - значение величины, полученное в результате измерений более точным техническим средством.

Отличие результата измерения от истинного значения объясняется несовершенством средств измерений, несовершенством способа применения средств измерений, влияние условий выполнения измерения, участием человека с его ограниченными возможностями и т. д. Отклонения результата измерения от истинного значения измерения величины называется погрешностью измерения. Ценность определения погрешности имеет смысл только в том случае, если дана оценка погрешности при измерении той или иной физической величиной. При этом чаще всего определяют не конкретную погрешность результата, а степень недостоверности, то есть границы зоны, в которой находится погрешность.

Физические величины в зависимости от множества размеров, которые они могут иметь при изменении в ограниченном (или заданном) диапазоне, подразделяются на непрерывные (аналоговые) и дискретные, то есть квантованные по размеру (уровню). Аналоговая величина может иметь в заданном диапазоне бесконечное множество размеров, и подавляющее большинство физических величин относится к этой категории, такие как температура, давление, напряжение, сила тока и др. Дискретная величина имеет в заданном диапазоне только определённое, (счётное) количество размеров, например, электрический заряд, который определяется числом входящих в него зарядов электронов.

Физическую величину, которой по определению присвоено числовое значение, равное единице, называют единицей физической величины. Размер единицы физической величины может быть любым. Однако измерения должны выполняться в общепринятых единицах.

Общность единиц в международном масштабе устанавливают международными соглашениями. В Украине действует ГОСТ 8.417-81 "Государственная система обеспечения единства измерений, единицы физических величин", согласно которому в нашей стране введена к обязательному применению международная система единиц (СИ).

1.3 Единица физической величины

Издавна человек пользовался различными единицами для количественного оценивания расстояния между населенными пунктами, площади земельных участков, продолжительности дня и т. п. Так, например, на Руси длительное время применялись такие меры длины как

"вершок" - длина фаланги указательного пальца от слова "верх" - верх перста; "пядь малая" - расстояние между концами раздвинутых большого и указательного пальцев руки; "пядь большая" - расстояние между концами раздвинутых большого пальца и мизинца; "пядь с кувырком" - получается добавлением к малой пяди еще трех суставов указательного пальца; "локоть" или по-персидски арш, то есть "аршин" - расстояние от локтевого сустава до конца среднего пальца вытянутой руки; "маховая сажень" — расстояние между концами средних пальцев вытянутых в противоположные стороны рук; "косая сажень" - расстояние от пятки одной ноги до конца пальцев разжатой ладони поднятой вверх руки.

Как видно из приведенного примера, использовались субъективные единицы длины, которые отождествлялись с названиями частей человеческого тела. Во многих странах Западной Европы также использовался этот принцип установления единиц длины как "дюйм" - длина второго сустава большого пальца руки, "фут" - длина ступни человека, "ярд" - расстояние от кончика носа короля Англии Генриха I (XI - XII вв.) до конца среднего пальца его вытянутой руки.

Многие государства в Европе вплоть до XVIII века использовали в повседневной жизни различные единицы физических величин, что тормозило развитие торговли, промышленности, науки и других сфер человеческой деятельности в расширяющихся межгосударственных отношениях. Попытки решения этой проблемы привели к созданию метрической системы мер, которая зародилась во Франции в середине XVIII века и была принята французским национальным собранием 8 мая 1790 г.

Метрическая система мер состояла из единиц длины, площади, объёма и массы. Основанная на единице длины - метре, она получила наименование метрической.

Метр был получен путем измерения длины парижского меридиана триангуляционным методом (то есть измерение части меридиана от Барселоны до Дюнкерка с использованием триангуляционных релейных вышек) и определен как одна сорокамиллионная часть парижского меридиана.

Единица массы - килограмм - первоначально была определена как масса чистой воды в объёме 1 $дм^3$ при температуре 4°С (вода при этой температуре имеет максимальную плотность). В качестве единиц площади и объёма были приняты 1 $м^2$ и 1 $м^3$. Одновременно было введено десятичное подразделение кратных и дольных единиц и приняты приставки: мили (10^{-3}), санти (10^{-2}), деци (10^{-1}), дека (10^{1}), гекто (10^{2}),

кило (10^3).

Во второй половине XIX века, после подписания Метрической конвенции (20 мая 1875 г.), метрическая система получила международное признание. Комиссия Международного комитета мер и весов подготовила предложение по международной системе единиц, которая была принята в 1960 г. на XI Генеральной конференции по мерам и весам. Система получила название: Международная система единиц (сокращенно SI, СИ). В Международную систему единиц вошло 7 основных единиц:

- метр – равен длине пути, проходимого в вакууме светом за 1/299792458 долю секунды;
- килограмм – равен массе международного прототипа килограмма;
- секунда – равна 9192631770 периодам излучения соответствующего перехода между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133;
- ампер – равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум прямолинейным параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого круглого сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н;
- кельвин – равен 1/273,16 части термодинамической температуры тройной точки воды;
- канделла – равна силе света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, энергетическая сила света которого в этом направлении составляет $1/683 \frac{\text{Вт}}{\text{ср}}$ (Вт/ср - ватт на стерадиан);
- моль – равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

Кроме того, в состав Международной системы единиц вошли 29 производных величин.

Обозначения основных, дополнительных и производительных величин приведены в таблицах 1.1 и 1.2.

Одновременно с принятием Международной системы единиц XI Генеральная конференция по мерам и весам приняла двенадцать десятичных кратных и дольных приставок, к которым в

Таблица 1.1 – Обозначения основных и дополнительных единиц.

Величина			Единица		
Наименование	Размерность	Рекомендуемое обозначение	Наименование	Обозначение	
				Русское	Международное
Основные единицы					
Длина	L	l, L	метр	м	т
Масса	M	m	килограмм	кг	kg
Время	T	t, T	секунда	с	s
Сила электрического тока	I	i	ампер	А	A
Термодинамическая температура	Θ	T, Θ	кельвин	К	K
Сила света	J	Iv	канделла	кд	cd
Количество вещества	N	N, v	моль	моль	mol
Дополнительные единицы					
Плоский угол		φ	радиан	рад	rad
Телесный угол		Ω	стерадиан	ср	sr

Таблица 1.2 – Обозначение производных единиц, имеющих специальные (собственные) наименования.

Величина			Единица		
Наименование	Размерность	Рекомендуемое обозначение	Наименование	Обозначение	
				Русское	Международное
Частота	T^{-1}	f, ν	герц	Гц	Hz
Сила, вес	LMT^{-2}	F, G, P	ньютон	Н	N
Давление	$L^{-1}MT^{-4}$	P	паскаль	Па	Pa
Энергия, работа, количество теплоты	L^2MT^{-2}	E, W, Q, A	джоуль	Дж	J
Мощность, поток энергии	L^2MT^{-3}	P, N	ватт	Вт	W
Количество электричества	TI	Q, N	кулон	Кл	C
Электрическое напряжение	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	U, V	вольт	В	V
Электрическая емкость	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	C	фарад	Ф	F
Электрическое сопротивление	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	R, r	ом	Ом	Ω
Электрическая проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	G	сименс	См	S
Поток магнитной индукции, магнитный поток	$L^2MT^2I^{-1}$	Ф	вебер	Вб	W_E
Плотность магнитного потока, магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	B	тесла	Тл	T
Индуктивность	$L^2MT^2I^{-1}$	L	генри	Гн	H
Световой поток	J	$Ф_ν$	люмен	лм	lm
Освещенность	$L^{-2}J$	$E_ν$	люкс	лк	lx
Активность радионуклида	T^{-1}	A	беккерель	Бк	B_q
Полевая поглощенная доза	L^2T^{-2}	D	грей	Гр	$G_γ$
Эквивалентная доза излучения	L^2T^{-2}	H	зиверт	Зв	$S_υ$

дальнейшем были добавлены новые. Приставки СИ дают возможность образовывать десятичные кратные и дольные единицы от единиц СИ и от других единиц. В таблице 1.3 приведены наименования и обозначения приставок СИ.

Таблица 1.3 – Наименования и обозначения приставок СИ для образования десятичных кратных и дольных единиц и их множители.

Приставка			Множитель	Примеры
Наименование	Обозначение			
	Международное	Русское		
Экса	E	Э	10^{15}	эксабекерель – Эбк
Пета	P	П	10^{15}	петаджоуль – ПДж
Тера	T	Т	10^{12}	терагерц – ТГц
Гита	G	Г	10^{9}	гигаватт – ГВт
Мега	M	М	10^{6}	мегаом – МОм
Кило	k	к	10^{3}	километр – км
Гекто	h	г	10^{2}	гектолитр – гл
Дека	da	да	10^{1}	декалитр – дал
Деци	d	д	10^{-1}	дециметр – дм
Санти	c	с	10^{-2}	сантиметр – см
Милли	m	м	10^{-3}	милливольт – мВ
Микро	μ	мк	10^{-6}	микроампер – мкА
Нано	n	н	10^{-9}	наносекунда – нс
Пико	p	п	10^{-12}	пикофарад – пФ
Фемто	f	ф	10^{-15}	фемтокулон - фКл
Атто	a	а	10^{-18}	аттограмм – аг

Внесистемные единицы.

Внесистемные единицы подразделяются на три вида:

- единицы, получившие распространение наравне с единицами СИ и в сочетании с ними (табл. 1.4);

- единицы, применяемые в специальных областях науки и техники (табл. 1.5.);

- единицы, временно допускаемые к применению (табл. 1.6).

Таблица 1.4 – Единицы, применяемые в сочетании с единицами СИ.

Наименование	Обозначение		Соотношение с единицей СИ
	Международное	Русское	
Тонна	t	Т	10^3 кг
Минута	min	мин	60 с
Час	h	ч	3600 с
Сутки	d	сут	86400 с
Градус Минута Секунда	…° …' …"	…° …' …"	(π/180)рад (π/10800)рад (π/б48000)рад
Литр	l	л	10^{-3} м^3
Градус Цельсия	…°C	...°C	По размеру градус Цельсия равен градусу Кельви-

Таблица 1.5 – Единицы, применяемые в специальных областях науки и техники.

Наименование	Обозначение		Соотношение с единицей СИ	Область применения
	Международное	Русское		
Астрономическая единица световой год парсек	ua ly pc	а. е. св. год пк	$1{,}49598\cdot10^{11}$ м $9{,}4505\cdot10^{15}$ м $3{,}0857\cdot10^{16}$ м	Астрономия
Диоптрия	—	дитр	1 м$^{-1}$	Оптика
Гектар	ha	га	10^4 м^2	Сельское и лесное хозяйство
Электронвольт	ev	эВ	$1{,}60219\cdot10^{-19}$ Дж	Физика

Таблица 1.6 – Единицы, временно допускаемые к применению

Наименование	Обозначение		Соотношение с единицей СИ	Область применения
	Международное	Русское		
Морская миля	n mile	миля	1852 м	В морской навигации
Карат		кар	$2 \cdot 10^{-4}$ кг	При взвешивании драгоценных камней
Узел	kn	уз	0,514 м/с	В морской навигации
Оборот в секунду оборот в минуту	r/s r/min	об/с об/мин	1 $с^{-1}$ 1/60 $с^{-1}$	Измерение частоты вращения
Бар	bar	бар	10^5 Па	Измерение давления

1.4 Правила написания наименований и обозначений единиц

Наименования единиц, включая специальные наименования в честь известных ученых, пишут со строчной буквы. Например, "один ампер (1 А)".

При склонении наименований производных единиц, состоящих из произведения единиц, изменяют только последнее наименование и относящееся к нему прилагательное. Например, "килограмм-метр в квадрате (кг. $м^2$)", "килограмм-метра в квадрате", "килограмм-метру в квадрате", "ньютон-секунда (Н·с) ", "ньютон–секунды" и т. д.

При склонении наименований единиц, представляющих собой дробь, изменяют только последнее наименование числителя и относящееся к нему прилагательное. Например: квадратный метр на секунду, квадратного метра на секунду, квадратным метром на секунду, килограмм-метр в секунду (кг·м/с), килограмм-метр в секунду.

В родительном падеже множественного числа окончания должны быть:

- у несклоняемых единиц (генри, кюри, промиле, тесла) неизменные, т. е. пять генри, три тесла и т. д.,
- у единиц женского рода, оканчивающихся на "а" (кандела, тонна) нулевые, т. е. десяти кандел, пяти тонн и т. д.;

- у единиц мужского рода, оканчивающихся на мягкий согласный звук (джоуль, паскаль, беккерель, моль) на "ей" (трех джоулей, пяти паскалей, двух беккерелей, десяти молей),
- у единиц мужского рода, оканчивающихся на твердый согласный звук (ампер, ват, вебер, вольт, герц, гон, грэй, децибел, карат, кельвин, киловатт кулон, люкс, люмен, метр, ньютон, ом, парсек, радиан, стерадиан, фарад, электрон-вольт), как правило, нулевые, т. е. десять ампер, пять кулон, трех фарад и т. д.

Исключение составляют наименование единиц мужского рода, оканчивающиеся на твердый звук и имеющие нетерминологические бытовые соответствия. Они применяются с окончанием "-ов": метр - метров, литр - литров, оборот в секунду - оборотов в секунду, узел - узлов, час - часов, грамм - граммов.

Наименование кратных и дольных единиц образуются путем присоединения приставок к наименованиям исходных единиц (приставка пишется слитно). Например, микрометр, пикофарад. Так как основная единица массы в СИ - килограмм - содержит приставку "кило", остальные приставки присоединяются к единице "грамм". Например: милиграмм.

Большинство единиц обозначаются буквами, но ряд единиц обозначаются специальными знаками (°- градус, ‘ - минута, “- секунда, % - процент, ‰ - промиле). Буквенные обозначения применяют двух видов - международное (с использование букв латинского и греческого алфавитов) и русское (с использованием букв русского алфавита). Все буквенные обозначения единиц печатают прямым шрифтом.

Обозначения единиц, образованных по фамилиям ученых, печатают с прописной буквы (220В, 5мВ, 3кВ и т. д.). После буквенного обозначения точка, как правило, не ставится (5мм, 15мкВ, 101кПа, 2с, 12ч), за исключением сокращений слов, входящие в наименование единицы (760 мм рт. ст. и др.)

Обозначения единиц помещают в одной строке с числовым значением величины, не отрывая от него (не перенося на другую сторону), но оставляя пробел между числом и обозначением (5 нс, 10 пФ, 12В, 99%). Пробел не оставляют при обозначениях единицы в виде знаков, поднятых над строкой (...°, …’, …”), например, 5° 15’30”.

Буквенные обозначение единиц, образующих произведение, разделяют точкой на средней линии строки (Па·с, Ом·м). В машинописных текстах допускается ставить точку на нижней линии (Па.с, Ом.м).

Для отношений единиц в буквенных обозначениях применяют только одну косую или горизонтальную черту. Например, м/с, кг/м^3. Произведение в знаменателе помещают в круглые скобки. Например, Вт/(кг·К), моль/(с·м^3).

Не допускается комбинирование наименования и обозначения единиц. Следует писать: 11км/с или 11 километров в секунду. При указании значений величин с предельными отношениями числовое значение величины и отклонение берут в скобки, а обозначение единицы выносят за скобки или обозначение единицы проставляют после значения величины и предельного отклонения. Например: надо писать (220 ± 22)В или 220 ± 22 В.

Нельзя в текстах давать обозначение единицы без указания числового значения величины. Например, будет неверным выражение: вычисления ведутся в %. Правильно: вычисления ведутся в процентах. В заголовках граф и наименованиях строк таблиц допускается обозначение единиц без указания числового значения величины.

1.5 Классификация средств измерений

По функциональному назначению средства измерения делят на следующие группы:

- меры;
- измерительные преобразователи;
- измерительные приборы;
- измерительные информационные системы и измерительные установки.

Под *мерой* понимают средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. Например, гиря есть мера массы; температурная лампа - мера яркостной или цветовой температуры и др.

Измерительный преобразователь - средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Измерительный преобразователь, к которому подводится измеряемся величина, называют *первичным измерительным преобразователем*. В качестве примера можно привести термоэлектрический термометр (термопара), термометр сопротивления, сужающее устройство расходомера. Измерительный преобразователь, предназначенный для изменения размера величины в заданное число раз,

называют *масштабным измерительным преобразователем*. Например: делитель напряжения, измерительный трансформатор тока, измерительный усилитель.

В зависимости от рода измеряемой величины на входе измерительные преобразователи делят на преобразователи электрических, пневматических и других величин.

Измерительные преобразователи в зависимости от вида входного и выходного сигналов делят на:

- *аналоговые измерительные преобразователи*, у которых на входе и на выходе аналоговые сигналы;

- *аналого-цифровые измерительные преобразователи*, имеющие на входе аналоговый сигнал, а на выходе декодированный цифровой сигнал;

- *цифро-аналоговые измерительные преобразователи*, у которых на входе числовой кодированный сигнал, а на выходе аналоговый сигнал.

Первичные измерительные преобразователи, расположенные непосредственно на объекте (в трубопроводе, в кладке печи, в резервуаре, в реакторе, в дымоотводящих трактах и т. д.) и удаленные от места обработки измерительной информации, называют иногда *датчиками* (датчик температуры, давления и т.д.).

Измерительным прибором называют средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, например, в виде цифрового отсчета на отсчетном устройстве. Измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины, называют *аналоговым измерительным прибором*. Например, милливольтметр или потенциометр для измерения температуры с отсчетным устройством в виде стрелки и шкалы - аналоговый прибор.

Измерительный прибор, автоматически вырабатывающий дискретный (кодированный) сигнал измерительной информации и дающий показания в цифровой форме, называют *цифровым измерительным прибором* (цифровой термометр, цифровой вольтметр и др.).

В зависимости от вида представляемой информации об измеряемой величине измерительные приборы разделяются на:

- показывающие: измерительный прибор, допускающий только отсчитывание показаний значений измеряемой величины. Например, показывающий милливольтметр, жидкостный термометр и др.

- регистрирующие: измерительный прибор, в котором преду-

смотрена регистрация (запись) показаний (барограф, потенциометр, расходомер и др.).

- суммирующие: измерительный прибор, осуществляющий сумму двух или нескольких величин, подводимых к нему по различным каналам (ваттметр для измерения суммы мощности нескольких электрических генераторов, водомер, расходомер и др.).

- интегрирующие: измерительный прибор, в котором значение измеряемой величины определяется путем ее интегрирования по другой величине (электрический счетчик электроэнергии, тепломер, водомерный счетчик и др.).

На крупных объектах (котлы тепловых электростанций, доменные печи и др.), когда необходимо измерять большое число физических величин, производить обработку измерительной информации, воздействовать на объект и т. д., применяют *измерительные информационные системы*.

Измерительная информационная система - это совокупность функционально объединенных измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других вспомогательных технических средств, размещенных в разных точках контролируемого пространства (среды, объекта и т. п.) с целью измерения одной или нескольких физических величин, свойственных этому пространству. В зависимости от назначения измерительные системы разделяют на информационные, контролирующие и управляющие системы

1.6 Общие понятия об эталонах

Для обеспечения единства измерений необходима тождественность единиц, в которых проградуированы все средства измерений одной и той же физической величины. Это достигается путем точного воспроизведения и хранения установленных единиц физических величин и передачи их размеров применяемым средствам измерений. Французское слово "etalon" означает образец, мерило, узаконенный тип чего - либо, тщательно изготовленную меру, принятую в качестве образца. Первоначально, когда создавались международные эталоны килограмма и метра, выполненные в виде тщательно изготовленных образцов, этот смысл вкладывался и в понятие "эталон", применяемое в метрологии. С развитием приборостроения многие средства измерений, особенно высокой точности, стали приобретать вид измерительных комплексов. В значительной степени это коснулось эталонов, особенно первичных и специальных. В связи с этим изменилось и по-

нятие "эталон".

Эталон представляет собой средство измерения (или комплекс средств измерений), обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы физической величины (или одну из этих функций) с целью передачи размера единицы образцовым, а от них рабочим средствам измерений и утвержденное в качестве эталона в установленном порядке.

Различают эталоны первичные и вторичные. Если эталон воспроизводит единицу с наивысшей в стране точностью, он называется *первичным*. Первичные эталоны основных единиц воспроизводят единицу в соответствии с ее определением. Примером первичного эталона является комплекс средств измерений для воспроизведения метра в длинах световых волн излучения криптона - 86. Первичные эталоны, а также их разновидности - специальные первичные эталоны, утверждают в качестве государственных эталонов, которые утверждаются Государственным комитетом стандартов, и на каждый из них утверждается государственный стандарт.

Основное назначение эталонов - служить материально - технической базой воспроизведения и хранения единиц физических величин. Основные единицы Международной системы единиц (СИ) должны воспроизводиться с помощью государственных эталонов, т.е. централизовано. Дополнительные, производные, а при необходимости и внесистемные единицы, исходя из технико-экономической целесообразности, воспроизводятся одним из двух способов:

- централизованно - с помощью единого для всей страны государственного эталона;

- децентрализовано - посредством косвенных измерений, выполняемых в органах метрологической службы с помощью образцовых измерений.

Централизовано воспроизводится большинство важнейших производных единиц СИ (ньютон, джоуль, паскаль и др.), а децентрализовано - производные единицы, размер которых не может передаваться прямым сравнением с эталоном.

В метрологической практике широко распространены *вторичные эталоны*, значения которых устанавливаются по первичным эталонам и которые создаются и утверждаются в тех случаях, когда это необходимо для организации поверочных работ и для обеспечения сохранности и наименьшего износа государственного эталона. По своему метрологическому назначению вторичные эталоны делятся на эталоны - копии, эталоны - сравнения, эталоны - свидетели и рабочие эталоны.

Наряду с эталонами в нашей стране широко распространен класс средств измерений, предназначенных для поверки, называемые образцовыми средствами измерений.

Образцовое средство измерений - средство измерений, предназначенное или применяемое для поверки рабочих средств измерений. Образцовые средства измерений в зависимости от точности подразделяются на разряды 1-й, 2-й и т.д.; 1-й разряд - самый высокий. Число разрядов для каждого вида средств измерений устанавливается государственной поверочной схемой.

Государственные эталоны хранятся в метрологических институтах страны. Для проведения работ с государственными эталонами назначаются особые ответственные лица – ученые, хранители эталонов. Вторичные эталоны используются как в метрологических институтах, так и в различных метрологических службах крупных городов, где по разрешению Госстандарта страны допускается их хранение и применение в органах ведомственной метрологической службы.

Кроме национальных эталонов единиц физических единиц существуют *международные эталоны*, хранимые в Международном бюро мер и весов. Программой деятельности международного бюро предусмотрены систематические международные сличения национальных эталонов крупнейших метрологических лабораторий разных стран с международными эталонами и между собой. Эталоны метра и килограмма сличают раз в 25 лет, остальные величины - в 3 года.

1.7 Показатели качества средств измерений

Для средств измерений, как и для любого вида продукции на Украине, установлены следующие показатели качества:

- показатели назначения;
- показатели надежности;
- показатели экономного использования сырья, материалов, топлива, энергии и трудовых ресурсов;
- эргономические показатели;
- эстетические показатели;
- показатели технологичности;
- показатели транспортабельности;
- показатели стандартизации и унификации;
- патентно-правовые показатели;
- экологические показатели;
- показатели безопасности.

Ниже приводятся более подробные характеристики наиболее важных показателей качества средств измерений.

Показатели назначения характеризуют основные функции средства измерения, область ее применения. Эти показатели подразделяются на три подгруппы: показатели функциональные и технической эффективности, конструктивные показатели, показатели состава и структуры.

К показателям функциональным и технической эффективности средств измерений относятся метрологические характеристики (предел допускаемого значения основной и дополнительной погрешности, динамические характеристики, классы точности), показатели быстродействия, уровня автоматизации процесса измерений, максимальная продолжительность времени непрерывной работы и др.

Конструктивные показатели средств измерения - это граница нормальных и рабочих областей измерения значений влияющих величин (температуры окружающего воздуха, относительной влажности, атмосферного давление и т.д.), характеристики прочности, весовые, габаритные и другие показатели.

Показатели надежности включают такие характеристики как безотказность, долговечность, и ремонтопригодность. Показатели безотказности оценивают временем непрерывной работы средств измерений до наступления отказа. К ним относят вероятность безотказной работы за заданное время, интенсивность отказов, среднюю наработку до отказа. Особое значение для средств измерения имеют показатели метрологической надежности, т.е. показатели безотказности, учитывающие только метрологические отказы средств измерения.

Метрологические отказы заключаются в потере средством измерений метрологической исправности и наступают в тот момент, когда хотя бы одна из метрологических характеристик превышает установленную для нее норму. Такие отказы являются следствием закономерно протекающих во всех элементах и соединениях процессов износов, старения и разрегулировки.

Время наступления метрологического отказа - величина случайная, и она обусловлена случайной скоростью протекания направленных процессов износов и старение средств измерения. Метрологический отказ протекает скрытно и никак не проявляется внешне. От средства измерений поступает информация неудовлетворительного качества, что приводит к нарушению технологического процесса при его управлении по данному средству измерения. Именно поэтому проблеме повышения метрологической надежности средств измере-

ний необходимо уделить большое внимание.

Для оценки метрологической надежности средств измерений предлагается следующая последовательность работ, получившая распространение на практике. В техническое задание вносится показатель метрологической надежности - вероятность работы без метрологических отказов за время, равное межповерочному интервалу. Выбирается наиболее целесообразный с точки зрения экономической эффективности или организации эксплуатации межповерочный интервал. Значение вероятности выбирают исходя из ответственности измерений и требований к их достоверности. Если аналитическую оценку получить невозможно разработчики оценивают нестабильность экспериментально, путем проведения испытаний макетов средств измерений или их узлов.

При испытаниях на надежность установочной серии средств измерений периодически экспериментально оцениваются нормируемые метрологические характеристики. С учетом этих оценок прогнозируются изменения метрологических характеристик за межповерочный интервал и вероятность работы без метрологических отказов в течении межповерочного интервала

Фактические показатели метрологической надежности оцениваются изготовителями средств измерений по результатам подконтрольной эксплуатации серийных образцов. Сведения об их соответствии или несоответствии нормируемым значениям предъявляются на государственные контрольные испытания. Если фактические показатели метрологической надежности существенно отличаются от нормируемых, принимается решение о соответствующем изменении (увеличении или уменьшении) межповерочного интервала.

Эргономические показатели характеризуют систему "человек - средство измерений". Они учитывают комплекс гигиенических, антропометрических, физиологических и психологических свойств человека, проявляющихся в производственных процессах. К этим показателям относятся уровни шума, температуры, соответствий конструкции изделия силовым возможностям человека и др.

Эстетические показатели характеризуют информационную выразительность, рациональность формы, целостность композиции, совершенство производственного исполнения. К ним относят показатели оригинальности, стилевого соответствия, отделки поверхности, четкости исполнения указателей и др. Эстетические показатели должны обеспечивать наименьшее нервно - эмоциональное напряжение и утомляемость оператора, что способствует сокращению числа грубых

ошибок, повышению скорости работы и точности снятия показаний.

Показатели стандартизации и унификации характеризуют насыщенность средств измерений стандартными и унифицированными составными частями. В настоящее время используются некоторые унифицированные средства измерения (например, комплекс средств измерения давления и расхода) и осуществляется унификация других средств измерений с целью создания информационно-измерительных систем и единых приборных комплексов на базе стандартных блоков и узлов, предназначенных для решения любых измерительных задач. Унификация средств измерения позволит обеспечить информационную, метрологическую, энергетическую и эксплуатационную совместимости основных частей, разрабатываемых систем.

Экологические показатели - показатели уровня вредных воздействий отдельных элементов средств измерений на окружающую среду при их эксплуатации. К экологическим показателям относятся: допустимое содержание вредных веществ, выбрасываемых в окружающую среду, допустимая мощность электромагнитных и ионизирующих излучений и др. При выборе этих показателей необходимо учитывать требования охраны окружающей среды.

Показатели безопасности характеризуют среднее время безопасной работы защитных устройств. Показатели безопасности содержатся в стандартах технических условий и показателей качества средств измерения. Так, на средства электрических измерений указывается электрическая прочность изоляции, электрическое сопротивление изоляции, между токоведущими цепями и корпусом предусматривается заземление, световая индикация сетевого выключателя, знаки безопасности и т. д.

1.8 Погрешности измерений

При любых измерениях любыми средствами измерения полученное значение физической величины отличается от его истинного значения. Это связано с несовершенством применяемых методов измерения, средств измерений, непостоянством условий измерений и т.д. Отклонение результата измерения от истинного значения называется погрешностью измерения. Однако согласно одному из постулатов метрологии, истинное значение определить невозможно и поэтому погрешность определяется по отклонению результата измерения от действи-

тельного значения измеряемой величины, определяемая по формуле:

$$\Delta x_{изм} = x_{изм} - x_д, \quad (1.1)$$

где $\Delta x_{изм}$ - погрешность измерения;

$x_{изм}$ - измеренное значение физической величины;

$x_д$ - действительное значение.

При проведении измерений в качестве действительного значения величины применяют значение величины, полученное с помощью образцовых средств измерений. При многократных измерениях за действительное значение обычно принимают среднее арифметическое из ряда отдельных измерений.

Погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины, называется абсолютной погрешностью (т.е. $\Delta x_{изм}$ по формуле (1.1)). Однако, в большей степени точность средств измерений характеризует относительная погрешность, т.е. выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины:

$$\delta = \frac{\Delta x_{изм}}{x_д} 100\% \quad (1.2)$$

Если диапазон измерения прибора охватывает и нулевое значение измеряемой величины, то относительная погрешность обращается в бесконечность в соответствующей ему точке шкалы. В этом случае пользуются понятием приведенной погрешности, равной отношению абсолютной погрешности измерительного прибора к "размаху шкалы", т.е. ко всей длине шкалы, выраженной в единицах измеряемой величины:

$$\gamma = \frac{\Delta x_{изм}}{x_2 - x_1} 100\%, \quad (1.3)$$

где x_1 - наименьшая цифровая отметка на шкале прибора;

x_2 - наибольшая цифровая отметка на шкале прибора.

Пример 1.1. При измерении давления в рабочем пространстве нагревательной печи тягонапоромером (рабочий прибор) было зафиксировано значение +21 Па. Показание образцового прибора составило +20,5 Па. Определить абсолютную, относительную и приведенную погрешности, если крайние цифровые отметки на шкале рабочего прибора равны - 200 Па и +200 Па.

Абсолютная погрешность: $\Delta x_{изм}$=21–20,5=0,5 Па.

Относительная погрешность: $\delta = \frac{0,5}{20,5} 100\% = 2,4\%$.

Приведенная погрешность: $\gamma = \frac{0,5}{200-(-200)} 100\% = 0,125\%.$

Пример 1.2. Температура пара, измеренная рабочим прибором, составила 520 °С, а образцовым - 530 °С. Определить приведенную погрешность, если крайние цифровые отметки на шкале рабочего прибора равны +200 °С и +800 °С.

Приведенная погрешность: $\gamma = \frac{530-520}{800-200} 100\% = 1,67\%.$

Целью вычисления погрешностей измерений является оценка точности результата измерения или введение поправок в результаты измерений.

Погрешности измерений могут быть классифицированы по следующим признакам: по характеру проявления — систематические и случайные; по способу выражения - абсолютные и относительные; по условиям изменения измеряемой величины - статические и динамические; по способу обработки ряда измерений - средние арифметические и средние квадратические; по полноте охвата измерительной задачи - частные и полные; по отношению к единице физической величины - погрешности воспроизведения единицы, хранения единицы и передачи размера единицы.

Систематическая погрешность измерения - составляющая погрешности результата измерения, остающаяся постоянной или же закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же физической величины. В зависимости от характера изменения систематические погрешности подразделяются на *постоянные*, *прогрессивные* и *периодические*.

Постоянные погрешности - погрешности, которые длительное время сохраняют свое значение, например, в течение времени выполнение всего ряда измерений. Они встречаются наиболее часто и являются в общем случае функцией измеряемой величины, влияющих величин и времени (например, влияние температуры окружающей среды, влажности воздуха или газовой среды, атмосферного давления и др.).

Прогрессивные погрешности - непрерывно возрастающие или убывающие погрешности. К ним относятся, например, погрешности вследствие износа непрерывно трущихся или периодически контактирующих элементов измерительных приборов в процессе измерений. Подобные погрешности имеют место в процессе прогрева ламп, диодов, транзисторов и других элементов в электрической схеме измерительных приборов.

Периодические погрешности - погрешности, значение которых являются периодической функцией времени или функцией перемещения указателя измерительного прибора. Например, погрешность показаний измерительного прибора с круговой шкалой и стрелкой, если ось стрелки смещена на некоторую величину (эксцентриситет) относительно центра шкалы. Эта погрешность изменяется по синусоидальному закону.

В зависимости от причин появлений систематические погрешности подразделяются на инструментальные, погрешности метода измерений, субъективные, погрешности вследствие отклонения условий измерения от установленных методиками.

Инструментальная погрешность является следствием ряда причин: износ деталей прибора, неточное нанесение штрихов на шкалу и др.

Погрешность метода измерений может возникнуть из-за несовершенства метода измерений или допущенных его упрощений, установленных методикой измерений. Например, такая погрешность может быть обусловлена недостаточным быстродействием применяемых средств измерений при измерении параметров быстропротекающих процессов.

Выделение систематических погрешностей в отдельную группу обуславливается, таким образом, тем, что при поверке измерительных средств они могут быть определены для каждой точки шкалы и исключены из результатов последующих измерений.

Субъектная погрешность обусловлена индивидуальными особенностями оператора. Встречаются операторы, которые систематически опаздывают или опережают снять отчеты показаний средств измерений. Такую погрешность иногда называют личной погрешностью.

Случайная погрешность измерения это одна из составляющих общей погрешности, которая изменяется случайным образом, как по знаку, так и по значению, в серии измерений одного и того же параметра физической величины. Причины случайных погрешностей: погрешности округления при отсчете показаний, вариация показаний, изменение условий измерений случайного характера и др., т.е. таких погрешностей, в появлении которых не наблюдается какой - либо закономерности. Случайные погрешности неизбежны и не устранимы и всегда присутствуют в результате измерения. Они вызывают рассеяние результатов при многократном и достаточно точном измерении одной и той же величины при неизменных условиях**.**

Теоретические исследования, подтвержденные практикой, пока-

зывают, что при большом числе измерений случайные погрешности одинакового значения, но разного знака, встречаются одинаково часто, а большие (по абсолютному значению) погрешности встречаются реже, чем малые. Из этих исследований следует важный для практики вывод, что при увеличении числа измерений случайная погрешность результата, полученного из ряда измерений, уменьшается вследствие того, что сумма погрешностей отдельных измерений данной серии стремится к нулю.

Средняя арифметическая погрешность - обобщенная характеристика рассеяния (вследствие случайных причин) отдельных результатов измерений, входящих в серию из "n" равноточных независимых измерений, вычисляемая по формуле:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} | x_i - \bar{x} |}{n} \qquad (1.4)$$

где x_i - результат i-го измерения, входящего в серию;

$\bar{x}$ - среднее арифметическое из "n" значений величины;

$|x_i - \bar{x}|$ - абсолютное значение погрешности i-го измерения;

r - средняя арифметическая погрешность.

Пример 1.3. Получено 10 результатов измерения температуры факела пирометром (i от 1 до 10) в °С: 1859, 1849, 1855, 1848, 1853, 1852, 1842, 1851, 1846, 1845.

Отсюда: $\bar{t}$ =1850 °С, $\Delta t_1 = t_1 - \bar{t}$ =+9°С; $\Delta t_2 = t_2 - \bar{t}$ = –1°С…

$\Delta t_{10} = t_{10} - \bar{t}$ = –5°С.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} | \Delta t_i |}{n} = \frac{|+9| + |-1| + ... + |-5|}{10} = 4^{o}\mathrm{C}.$$

Отдельные погрешности колеблются в пределах от +9 до -8 °С. В среднем случайная погрешность одного измерения в серии r=±4°С.

Истинное значение средней арифметической погрешности "ρ" можно получить при бесконечно большом числе измерений из соотношения:

$$\rho = \lim_{n \to \infty} r \qquad (1.5)$$

Преимущество средней арифметической погрешности - простота ее вычисления. Но все же чаще определяют среднюю квадратическую погрешность.

Средняя квадратическая погрешность отдельного измерения -

обобщенная характеристика рассеивания (вследствие случайных причин) отдельных результатов измерений, входящих в серию из "n" равноточных измерений, вычисляемая по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n-1}} \qquad (1.6)$$

Статистическим пределом для S при $n \to \infty$ является величина σ:

$$\sigma = \lim_{n \to \infty} S$$

В действительности число измерений всегда ограничено, поэтому вычисляется не σ, а ее приближенное значение, которым является S. Чем больше "n", тем S ближе к своему пределу σ.

При числе измерений n>30 между средней арифметической (r) и квадратической (S) погрешностями существуют соотношения:

$$S = 1{,}25 \cdot r; \quad r = 0{,}80 \cdot S.$$

При нормальном законе распределения вероятность того, что погрешность отдельного измерения в серии не превзойдет вычисленную среднюю квадратическую погрешность, невелика: 0,68. Следовательно, в 32 случаях из 100 действительная погрешность может быть больше вычисленной.

Средняя квадратическая погрешность среднего арифметического - это характеристика случайной погрешности среднего арифметического значения результата измерений одной и той же величины в данном ряду измерений, вычисляемая по формуле:

$$S_{\overline{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n(n-1)}} = \frac{S}{\sqrt{n}} \qquad (1.7)$$

Из этой формулы видно, что погрешность измерений вследствие случайных причин может быть уменьшена в $\sqrt{n}$ раз, если выполнять n измерений одного размера какой-либо величины.

Пример 1.4. Проведено 10 измерений расхода газа V и получено $\overline{V}$ = 8150 м^3/ч.

Величина S, рассчитанная по формуле (1.6), равна S=47 м^3/ч.

В этом случае:

$$S_{\overline{v}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{47}{\sqrt{10}} = 14{,}8 \frac{м^3}{ч}$$

В конечном итоге можно записать:

$$R = \overline{R} \pm S_{\overline{v}} = 8150 \pm 14{,}8 \frac{м^3}{ч}.$$

Доверительный интервал погрешности результата измерений – это интервал значений случайной погрешности, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое (истинное) значение погрешности результата измерений. Доверительный интервал вычисляют для того, чтобы иметь большую уверенность в оценке погрешности результата измерений. При нормальном законе распределения доверительные границы погрешности вычисляют как $\pm t \cdot S$ или $\pm t \cdot S_x$, где t-число, зависящее от доверительной вероятности P и числа измерений n.

Пример 1.5. Проведено 10 измерений давления питательной воды парового котла и получено среднее арифметическое значение давления $\overline{P}$ =5,65 МПа, а также рассчитано значение S=±0,05 МПа. Доверительные границы погрешности для данного результата определяются по формуле:

$$P = \overline{P} \pm t \cdot S_{\overline{p}} \qquad (1.8)$$

При распределении Стьюдента для доверительной вероятности P=0,95 и n=10 величина t будет равна t=2,26 (приложение А)

Тогда P=5,65±0,05·2,26=5,65±0,11 МПа.

Пример 1.6. При градуировке хромель-копелевой термопары, рабочие концы которой были помещены в термостат с температурой 100°С, а свободные концы располагались в холодильнике с температурой 0°С, было произведено 12 измерений термо-ЭДС (мкВ): 6885; 6882; 6879,6883; 6877; 6878; 6878; 6881; 6882; 6875; 6877; 6883. Определить доверительные границы истинного значения термо-ЭДС термопары для принятой вероятности 0,95.

Решение. Определим: среднеарифметическое значение $\overline{x}$ =6880 мкВ; случайные отклонения результатов измерений $x_i - \overline{x}$; квадраты этих отклонений $(x_i - \overline{x})^2$ и расчетные данные сведем в таблицу 1.7.

Средняя квадратическая погрешность единичного измерения определяется по формуле (1.6):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \overline{x})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{68}{11}} = 2{,}5 \text{ мкВ}$$

Таблица 1.7 – Результаты расчета

i	Термо-ЭДС (x_i) мкВ	Случайные отклонения и их квадраты		i	Термо-ЭДС (x_i) мкВ	Случайные отклонения и их квадраты	
		$x_i-\overline{x}$	$(x_i-\overline{x})^2$			$x_i-\overline{x}$	$(x_i-\overline{x})^2$
1	6885	+5	25	7	6878	–2	4
2	6882	+2	4	8	6881	+1	1
3	6879	–1	1	9	6882	+2	4
4	6883	+3	9	10	6875	–5	25
5	6877	–3	9	11	6877	–3	9
6	6878	–2	4	12	6883	+3	9

Средня квадратическая погрешность результата среднего арифметического определяется по формуле (1.7):

$$S_{\overline{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}} = \frac{2,5}{\sqrt{12}} = 0,72 \text{ мкВ}$$

Истинное значение термо-ЭДС "x" хромель-копелевой термопары можно приближенно положить равным среднему арифметическому значению $\overline{x}$, т.е. $x \approx \overline{x}$. Для оценки достоверности этого равенства с доверительной вероятностью P=0,95 (по заданию) найдем доверительные границы, соответствующие этой вероятности. По таблице А1 приложения А для P=0,95 и к=n–1=11 (число степеней свободы), находим коэффициент t распределения Стьюдента: t=2,18.

Погрешность ε среднего арифметического значения результата измерения при малом числе наблюдений (измерений), т.е. при n<20 и заданной доверительной вероятности P=0,95 определяется по формуле:

$$\varepsilon = t \cdot S_{\overline{x}} = 2,18 \cdot 0,72 = 1,57$$

Таким образом, в соответствии с принятом условием, т.е. с вероятностью 0,95, можно утверждать, что истинное значение термо-ЭДС заключено между доверительными границами:

$$\overline{x} - \varepsilon = 6880 - 1,57 = 6878,43 \text{ мкВ}$$

$$\overline{x} + \varepsilon = 6880 + 1,57 = 6881,57 \text{ мкВ}$$

$$x \approx \overline{x} = 6880 \pm 1,57 \text{ мкВ}$$

Измерения, содержащие "грубые" погрешности, должны быть отброшены как не заслуживающие доверия. Однако, необходимо уточнить, в каких случаях такие значения должны быть отброшены. На практике часто пользуются простым предложением отбрасывать результаты, содержащие большие погрешности, т.е. превышающие 3S

или 4S. Однако этот прием нельзя считать достаточно строгим, т. к. погрешности являются случайными и поэтому появление погрешности само по себе не зависит от числа наблюдений.

При малом числе наблюдений (измерений) для определения какие измерения подлежат отбрасыванию, применяют критерий В. И. Романовского, основанный на распределении Стьюдента. Пусть получено n+1 результатов измерений x_1, x_2, x_3,…x_n. При этом "n" значений не вызывают сомнений в отношении соответствии их нормальному ряду, а одно кажется сомнительным в этом ряду.

Для этого случая определяется среднеарифметическое значение для "n" наблюдений и вычисляется среднеквадратическое отклонение. Далее, исходя из степени достоверности, которая должна быть обеспечена, зададимся вероятностью $P_к$ того, что разность $(x_{n+1}-\overline{x})$ не превышает некоторое допускаемое значение $\varepsilon_к$, определяемое по формуле:

$$\varepsilon_к = t_к \cdot S \qquad (1.9)$$

Значения $t_к$ для различных $P_к$ приведены в таблице 2 (Приложение А).

Если $\varepsilon_к < x_{n+1}-\overline{x}$, то измерение x_{n+1} подлежит исключению из ряда, как не заслуживающее доверия.

Пример 1.7. В дополнение к измерениям, данные которых приведены в таблице 1.7 было проведено тринадцатое измерение ЭДС термопары, значение которого x_{13}=6393 мкВ, а отклонение от среднего $x_{13}-\overline{x}$ =+13 мкВ. Оценка среднего квадратического отклонения по результатам 12 измерений S=2,5 мкВ. Задаваясь $P_к$=0,005 по таблице 2 (Приложение А), для n=12 находим $t_к$=4,62 и определяем:

$$\varepsilon_к = 4{,}62 \cdot 2{,}5 = 11{,}55 \text{ мкВ}$$

Тринадцатое наблюдение, для которого $x_{13} - \overline{x}_{12}$ =+13мкВ, подлежит исключению из ряда, так как 13>11,55.

1.9 Метрологические характеристики средств измерения

Большое значение при оценке качества и свойств средств измерений имеет знание их метрологических характеристик. Одной из таких характеристик является класс точности.

Классом точности называется обобщенная характеристика средства измерения, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность. Следует иметь в виду, что класс точности средств измерений характеризует их свойства в отношении

точности, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполняемых с помощью этих средств.

Классы точности удобны для сравнительной оценки качества средств измерений, их выбора, международной торговли, и они присваиваются средствам измерений при их разработке. В процессе эксплуатации метрологические характеристики средств измерений ухудшаются и поэтому допускается понижение класса их точности по результатам метрологической аттестации или поверки.

Основой для присвоения измерительным приборам того или иного класса точности является их основная погрешность и способ ее выражения. Средства измерений выпускаются на следующие классы точности: 0,01; 0,015; 0,02; 0,025; 0,04; 0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,4; 0,5; 0,6; 1,0; 1,5; 2,0; 4,0; 5,0; 6,0. Условно можно разделить все средства измерения по классам точности на такие группы:

- индикаторы: 1–6
- рабочие: 0,1–1
- образцовые: 0,01–0,1
- эталоны: меньше 0,01

Классы точности измерительных приборов наносятся на циферблаты, шкалы или корпуса средств измерений в виде условных обозначении, например: 0,5; $\underset{\vee}{0{,}5}$; $\textcircled{0{,}5}$; 0,5/0,3. При этом, цифре 0,5 соответствует предел допускаемой погрешности $\delta=\pm 0{,}5\%$. Это приведенная погрешность, для которой нормируемое значение выражено в единицах измеряемой величины. Цифре со значком $\underset{\vee}{0{,}5}$ соответствует предел допускаемой погрешности $\delta=\pm 0{,}5\%$. Это так же приведенная погрешность, но нормируемое значение в этом случае - длина шкалы прибора. Цифре с кружком $\textcircled{0{,}5}$ соответствует предел допускаемой погрешности $\delta=0{,}5\%$. Это относительная погрешность, причем постоянная. Обозначению 0,5/0,3 соответствует предел допускаемой погрешности, выраженный формулой:

$$\delta = \pm\left[0{,}5 + 0{,}3\left(\frac{x_к}{x} - 1\right)\right] \qquad (1.10)$$

Это относительная погрешность, возрастающая с уменьшением измеряемой величины x, где $x_К$ - конечное значение диапазона измерений. Применяются и другие обозначения класса точности.

По классу точности прибора можно определить его допустимые абсолютную и относительную погрешности $\Delta x_{доп}$ и γ.

Для приборов с нулем в начале шкалы абсолютная погрешность составит:

$$\Delta x_{доп} = \frac{к \cdot x_N}{100}, \qquad (1.11)$$

где к - класс точности прибора;

x_N - нормирующее значение, равное верхнему пределу показаний прибора.

Тогда согласно выражению (1.2) или (1.3) приведенная основная погрешность прибора численно равна его классу точности, т.е.:

$$\gamma = \pm к \qquad (1.12)$$

Пример 1.8: Потенциометр класса точности 0,5 имеет шкалу 0…1600 °С. Определить допустимые абсолютную и относительную погрешности прибора.

$$\Delta x_{доп} = \frac{0{,}5 \cdot 1600}{100} = 8\ °C; \qquad \gamma = \pm 0{,}5\%$$

Для приборов, имеющих шкалу "с подавленным нулем" (т.е. на шкале прибора отсутствует значение "0" как в начале, так и в середине шкалы), необходимо дополнительно учитывать погрешность показаний на начальной отметке шкалы. Для таких приборов абсолютная основная погрешность рассчитывается по формуле:

$$\Delta x_{доп} = \pm\left(\frac{к \cdot Е}{100} + \frac{d \cdot Д}{100}\right), \qquad (1.13)$$

где Е - диапазон шкалы прибора, равный $x_2 - x_1$;

Д - диапазон "подавления" (нижний предел измерения);

d - значение поправки на "подавление нуля" (для приборов классов 0,5 и 1,0 d=±0,15, для класса 1,5 значение d=±0,25).

Заменяя в выражении (1.2) $x_д$ на Е, получим, что для приборов с "подавленным нулем" приведенная основная погрешность определяется следующим образцом:

$$\gamma = \pm\frac{\Delta x_{доп}}{Е}100 \qquad (1.14)$$

или

$$\gamma = \pm\left(к + \frac{d \cdot Д}{Е}\right) \qquad (1.15)$$

Таким образом, для этого типа приборов численное значение приведенной основной погрешности будет превышать число, указан-

ное в условном обозначении класса точности на величину $\frac{d \cdot Д}{E}$.

Пример 1.9. Определить погрешность потенциометра типа КСПЗ –П класса точности 1,5 для измерения температуры, имеющего шкалу +300…1600 °С.

По формуле (1.13) находим, что абсолютная основная погрешность на всех точках шкалы не должна превышать значение:

$$x_{доп} = \pm\left(\frac{к \cdot E}{100} + \frac{d \cdot Д}{100}\right) = \pm\left(\frac{1{,}5 \cdot (1600 - 300)}{100} + \frac{0{,}25 \cdot 300}{100}\right) = \pm 20{,}25 \ °C$$

Приведенная основная погрешность согласно формуле (2.14) составит:

$$\gamma = \pm\frac{\Delta x_{доп}}{E}100 = \pm\frac{20{,}25}{1300}100 = \pm 1{,}56\%$$

или по формуле (2.15)

$$\gamma = \pm\left(к + \frac{d \cdot Д}{E}\right) = \pm\left(1{,}5 + \frac{0{,}25 \cdot 300}{1300}\right) = \pm(1{,}5 + 0{,}06) = \pm 1{,}56\ \%$$

Пример 1.10. Определить погрешность вторичного прибора типа КСДЗ класса точности 0,5 для изменения расхода со шкалой 0…1600 $м^3$/ч. Согласно формуле (1.11) определяем абсолютную основную погрешность:

$$\Delta x_{доп} = \frac{к \cdot x_N}{100} = \frac{0{,}5 \cdot 1600}{100} = 8\frac{м^3}{ч}$$

Приведенная погрешность численно совпадает с классом точности прибора и равна:

$$\gamma = \pm к = \pm 0{,}5\%.$$

Вариацией показаний прибора называется разность между значениями отдельных показаний прибора, соответствующих одному и тому же значению измеряемой величины, полученных при приближении к нему как от меньших значений к большим, так и от больших к меньшим. Вариация показаний определяется одновременно с основной погрешностью как разность действительных значений измеряемой величины (по показаниями образцового прибора), соответствующих одной и той же отметке шкалы поверяемого прибора сначала при увеличении (прямое направление), а затем при уменьшении (обратное направление) значения измеряемой величины. При нескольких подходах к данной точке диапазона измерений в каждом из двух направлений вариация определяется как средняя разность.

Вариация обычно выражается в процентах от принятого нормирующего значения:

$$b = \frac{x_1 - x_2}{x_N} 100 \qquad (1.16)$$

где x_1 и x_2 - значения измеряемой величины при прямом и обратном направлениях подхода к данной точке измерения;

x_N - нормирующее значение прибора.

Вариация показаний вызывается появлением трения в опорах, люфтами, износом кернов, подпятников и др.

Вариация показаний не должна превышать 0,2% для приборов класса точности 0,25 и выше, а для приборов остальных классов (0,5; 0,6 и т. д.) не выше половины допустимого значения основной погрешности.

Чувствительность средства измерений - это отношение изменения сигнала на выходе этого средства (измерительного прибора, например) к вызывающему его изменению измеряемой величины. На рисунке 1.2 показана характеристика трех измерительных приборов (№1, № 2, №3) т.е. реакция приборов Δl_1, Δl_2, Δl_3 на входной сигнал Δx.

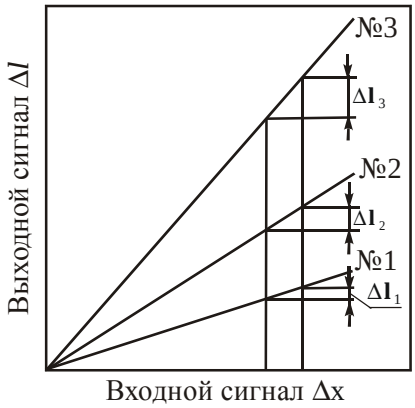


Рисунок 1.2 – Зависимость выходного сигнала от входного

Как видно из рисунка, наибольшая чувствительность, определяемая по формуле $r = \frac{\Delta l}{\Delta x}$, прибора №3, а наименьшая у прибора №1.

Иногда чувствительностью называют величину перемещения указателя прибора при изменении измеряемой величины на единицу, (например, 2 мм/град). Чувствительность не связана с величиной погрешности прибора. Иногда высокочувствительные приборы могут иметь большую погрешность, а прибор с малой чувствительностью - высокую точность измерений.

Погрешность измерительной системы.

При получении информации об измеряемой величине (температура, давление и т. д.) чаще всего используется измерительная система, в которую входят чувствительный элемент, преобразователь, измерительный прибор и другие устройства. Если класс точности собст-

венно измерительного прибора известен по его документации, то класс точности измерительной системы в целом, включая первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) и канал связи; не может нормироваться заранее, так как зависит от конкретных условий эксплуатации.

Согласно теории вероятностей можно считать, что с вероятностью, близкой к 100%, одновременное воздействие нескольких знакопеременных факторов (x_1, x_2, x_3, x_4…) дает суммарную погрешность:

$$S = \pm\sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \Delta x_3^2 + \Delta x_4^2 + ...} \qquad (1.17)$$

где Δx_1, Δx_2, Δx_3, Δx_4 - погрешности при воздействии факторов x_1, x_2, x_3, x_4, выраженные в процентах.

Вычисленная таким образом погрешность получила название средней квадратичной погрешностью. Обозначив погрешности различных элементов, входящих в измерительную систему, через ε_i, где i=1, 2,…n в соответствии с (1.17) получим:

$$S = \pm\sqrt{\Delta\varepsilon_1^2 + \Delta\varepsilon_2^2 + ... + \Delta\varepsilon_n^2} = \pm\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\Delta\varepsilon_i^2} \qquad (1.18)$$

Пример 1.11. Определить суммарную погрешность измерительной системы, состоящей из термопары типа ТХА, преобразователя измерительного типа НП (нормирующий преобразователь), преобразовывающего термо-ЭДС термопары в унифицированный сигнал постоянного тока 0-5 мВ, и вторичного показывающего прибора с токовым входом типа КСУ–3 со шкалой 0…1300° С и предназначенной для измерения температуры в печи. Указатель шкалы прибора КСУ-3 показывает, что температура в печи равна 1150 °С. Метрологическая поверка, термопары показала ее относительную погрешность 0,2 %. Основная погрешность прибора НП составляет ±1%, а прибора КСУ-3 ±0,5%. Погрешность оператора при отчете по шкале можно оценить в ±0,3%.

Согласно формуле (1.18) определим суммарную погрешность измерительной системы:

$$S = \pm\sqrt{0{,}2^2 + 1^2 + 0{,}5^2 + 0{,}3^2} = \pm 1{,}17\% .$$

Для вторичного прибора со шкалой 0…1300 °С величина суммарной погрешности составит:

$$S_{сум} = \pm 0{,}0117 \cdot 1300 = \pm 15{,}2°C.$$

Следовательно, для данного случая действительное значение измеренной температуры может находиться в пределах:

– нижний предел 1150 - 15,2=1134,8 °С;

– верхний предел 1150+ 15,2=1165,2 °С.

Таким образом, класс точности измерительной системы в целом (1,17%) оказался ниже класса точности каждого из входящих в систему элементов.

1.10 Подготовка к измерениям

Каждое измерение состоит из следующих элементов: объект измерений, средство измерений, метод измерений, условие измерений.

Измерения могут производиться как оператором, так и в автоматическом режиме. В первом случае результат измерения (т.е. измеренная величина) зависит как от действий самого оператора, так и от работы всех элементов, участвующих в процессе измерения. Чтобы обеспечить высокую точность измерений, их необходимо тщательно подготовить. При автоматизации измерений исключается погрешность оператора, а также резко снижается погрешность из-за колебаний влияющих величин и случайных факторов, что дает возможность резко повысить точность результата измерений. Широкое использование автоматизации при обработке результатов измерений позволяет избежать ошибок при расчетах, выбрать наиболее рациональный способ обработки экспериментальных данных.

Подготовка измерительного процесса включает: анализ постановки измерительной задачи, создание условий для измерений, выбор средств и метода измерений, выбор числа измерений, подготовку оператора, опробование средств измерений.

1.11 Анализ постановки измерительной задачи

Измерения высокого качества можно получить при правильной постановке измерительной задачи. При этом необходимо прежде всего выяснить какие физические величины или параметры объекта подлежат измерению, какой точности должен быть результат измерения и в какой форме его следует представить.

Выбор физических величин, которые необходимо контролировать для данного объекта, процесса или явления зависит от особенностей технологического процесса или объекта. При этом должна выполняться основная цель - получение наиболее полной информации об объекте и процессах, протекающих в объекте. После выявления физических величин, подлежащих измерению, анализируют второй вопрос постановки измерительной задачи.

Точность результата измерений зависит от качества средства из-

мерений. Чем точнее средство измерений, тем точнее результат измерения. Усложнение средств измерений приводит к резкому повышению стоимости измерительного процесса Необходимо стремиться к тому, чтобы при ограниченных затратах достигалась наибольшая точность измерений.

Как известно, при измерении возникают два вида погрешностей: систематические и случайные. Постоянные систематические или систематические погрешности, изменяющиеся по известному закону, стараются оценить и внести в виде поправки в результат измерения. Не исключенные систематические погрешности вместе со случайными характеризуют погрешность результата измерения. Характеристиками случайных погрешностей результата измерения могут быть:

- среднее квадратическое отклонение результата измерения $s(\overline{x})$ (точечная характеристика);

- доверительная погрешность случайной составляющей погрешности результата измерения $\varepsilon(P)$ или интервал, в границах которого находится истинное значение измеряемой величины, (интервальная характеристика).

При анализе постановки измерительной задачи необходимо выявить требования к быстроте получения измерительной информации, ее дискретности, уровню автоматизации, определить оптимальность (с точки зрения цели измерительной задачи) измеряемых параметров и др. От этого зависит выбор тех или иных средств измерений, метода и условий измерений, затраты труда оператора. Организация измерительных работ должна отвечать требованиям современных технологических процессов, в том числе автоматизированных.

1.12 Создание условий для измерений

Изменения внешних условий оказывают заметное влияние на измеряемую величину и используемые средства измерений. Влияющие величины можно разделить на четыре группы:

- климатические (температура окружающей среды, относительная влажность воздуха, атмосферное давление, освещенность);

- электрические и магнитные (колебания силы электрического тока, напряжения в электрической сети, частоты переменного электрического тока, постоянные и переменные магнитные поля и др.);

- внешние нагрузки (вибрации, ударные нагрузки, внешние касания деталей прибора);

- ионизирующие излучения, газовый состав атмосферы и т. д.

С целью обеспечения единства измерений к условиям их проведение предъявляются жесткие требования. Для конкретных областей измерений устанавливают единые условия, называемые нормальными. Значение физической величины, соответствующее нормальным условиям, называют номинальным значением влияющей физической величины. В таблице 1.8 приведены номинальные значения основных влияющих величин.

Таблица 1.8 – Номинальные значения влияющих физических величин.

	Влияющая величина	Номинальное значение влияющей величины
1	Температура для всех видов измерений	20 °С (293 К)
2	Давление окружающего воздуха для измерения ионизирующих излучений, теплофизических, температурных, магнитных электрических измерений, измерения давлений и параметров движения	100 кПа (750 мм рт. ст.)
3	Давление воздуха для линейных, угловых измерений, измерений массы, силы света, измерения в спектроскопии и других областях	101,3 кПа (760 мм рт. ст.)
4	Относительная влажность воздуха для линейных, угловых измерений, измерений массы, измерений в спектроскопии	58 %
5	Относительная влажность воздуха для измерений электрического сопротивления	55%
6	Относительная влажность воздуха для измерений температуры, силы, твердости, переменного электрического тока, ионизирующих излучений, параметров движения	65%
7	Относительная влажность воздуха для всех остальных видов измерений	60%
8	Плотность воздуха	1,2 кг/м^3
9	Ускорение свободного падения	9,8 м/с^2
10	Магнитная индукция (напряженность магнитного поля) и напряженность электростатического поля для измерений параметров движения, магнитных и электрических величин.	0
11	Магнитная индукция (напряженность магнитного поля) и напряженность электростатического поля для остальных видов измерений	Соответствует характеристикам поля Земли в данном географическом районе

В реальной практике измерений влияющие величины отклоняются в большей или меньшей степени от своих номинальных значений, указанных в таблице 1.8. Поэтому необходимо установить пределы возможных изменений для каждой влияющей величины. Эти пределы - их называют пределами нормальной области значений влияющих величин - выбирают так, чтобы воздействие совокупности влияющих величин на результат измерения было по возможности минимальным. Согласно метрологическим нормам (ГОСТ 8.395 - 80) для нормальных условий поверки принята такая область совокупных влияющих величин, под действием которых погрешность поверяемого средства измерений может изменяться не более чем на 35%. Однако (по этим же нормам), если погрешность вызвана действием оператора или выбранным методом измерения (а не самого средства измерения), то в этом случае допускается увеличение погрешности средств измерения в нормальных условиях в 1,5 … 2 раза.

При подготовке к измерениям необходимо определить рабочее пространство, то есть часть пространства, окружающего средство и объект измерения, действием влияющих величин вне которого на результат измерения можно пренебречь. Если рабочее пространство не установлено, то нормальные условия измерений обеспечиваются во всем помещении, где выполняют измерения.

При точных измерениях для поддержания нормальных условий применяют специальные средства защиты от воздействия влияющих величин. Так, влияние температуры исключают путем термостатирования, т.е. обеспечения определенной температуры в рабочем пространстве (цеха, помещения КИП, камеры с прибором) с использованием электрических подогревателей, холодильников, кондиционеров.

Для устранения вибраций и сотрясений применяют амортизаторы, струны, пружины, губчатую резину и др.

Средством защиты от влияния магнитного поля Земли служат экраны из магнитно-мягких материалов. Чтобы уменьшить влияние изменения атмосферного давления, применяют барокамеры.

При выполнении измерений в открытом пространстве, при высокой или низкой температуре соблюдать нормальные условия часто невозможно. В этом случае устанавливают менее жесткие условия выполнения измерений, называемые рабочими условиями.

1.13 Выбор средств и метода измерений

Получение информации об измеряемой физической величине с заданной точностью зависит от правильного выбора средств измерений. Измерения, проводимые средствами измерений более низкого класса точности, чем это требуется, имеют малую ценность, а иногда они недопустимы, так как приводят к браку или к неверным научным выводам.

Применение точных средств измерений связано с большими материальными затратами. Поэтому при их выборе необходимо учитывать не только метрологические характеристики, но и экономические и другие показатели. Как правило, при выборе средств измерений учитывают измеряемую величину, метод измерения, диапазон измерений и характеристики погрешности средств измерений, условия проведения измерений, допускаемую погрешность измерений, стоимость средств измерений, условия проведения измерении, простоту их эксплуатации. Однако на практике выбор средств измерений ставят в зависимость от решаемой измерительной задачи, отдавая предпочтение одним факторам и пренебрегая другими.

Основным критерием при выборе средств измерений является сопоставимость их погрешности с требуемыми для данного технологического процесса. При выборе средств измерений по точности необходимо учитывать требования к погрешности результата измерения и долю ее, приходящуюся на погрешность используемых средств измерений. С целью оценки суммарной погрешности анализируют существующие методы и средства измерений, условия проведения измерений, определяют влияющие величины. При этом устанавливают влияние условий проведения измерений и влияние погрешности средств измерений на погрешность результата измерений. Кроме того, оценивают погрешность предполагаемого метода, погрешность оператора. Суммарную погрешность $\Sigma\Delta x$ сравнивают с допускаемой погрешностью измерения $\Delta x_{доп}$.

$$\Sigma\Delta x = \Delta x_{м} + \Delta x_{с.и} + \Delta x_{усл} + \Delta x_{о} \le \Delta x_{доп}$$

где $\Delta x_{м}$ - предельная погрешность метода измерений;

$\Delta x_{с.и}$. - предел допускаемой погрешности используемых средств измерений;

$\Delta x_{усл}$ - предельная погрешность, обусловленная влиянием внешних факторов;

Δx_o - предельная погрешность оператора.

При неравенстве выбранное средство измерений обеспечивает получение результата измерений с погрешностью не более заданной. Если $\Sigma \Delta x > \Delta x_{доп}$, то уточняют составляющие погрешности результата. Если же уточнение не приводит к желаемому результату, выбирают более точное средство измерений. Если его нет, то используют первоначально выбранное. Однако в этом случае с помощью образцового средства измерений оценивают систематическую составляющую погрешности выбранного средства измерения и вносят поправку в результат измерений. Затем сравнивают новое значение суммарной погрешности с допускаемой. Если $\Sigma \Delta x' > \Delta x_{доп}$, вновь пересматривают составляющие суммарной погрешности. При необходимости ужесточают требования к колебаниям параметров окружающей среды путем применения термостатирования, кондиционеров и др.

Сравнение суммарной погрешности результата измерений с допускаемой проводят до тех пор, пока не получат неравенство $\Sigma \Delta x \leq \Delta x_{доп}$. Если требования к погрешности предполагаемого результата не позволяют достигнуть заданной точности, то для решения измерительной задачи требуются научные разработки, направленные на создание новых средств измерений и обеспечение необходимых условий измерений.

Большое значение для получения качественных результатов измерений оказывает выбор метода измерения, т.е. совокупность тех физических явлений, на которых основаны измерения. Основными методами измерений являются:

- метод непосредственной оценки;
- метод сравнения с мерой.

Наибольшее распространение получил метод непосредственной оценки, при котором измеряемую величину определяют непосредственно по отсчетному устройству средства измерений. Метод отличается простотой и не требует особых действий оператора и дополнительных вычислений. Основными источниками погрешности измерений при измерениях этим методом являются сами средства измерения. Этим объясняется необходимость тщательного выбора средств измерений, обеспечивающих высокую точность.

Если необходимо выполнить точное измерение, применяют дифференциальный или нулевой метод. Эти методы являются разновидностью метода сравнения с мерой. Для них характерно существование высокоточной меры, близкой к измеряемой величине. Погрешность

этих методов характеризуется в основном погрешностью используемой меры. Широко применяется этот метод в оптической пирометрии при измерении высоких температур, например, металла, факела, огнеупорной кладки и других высокотемпературных сред.

В этом методе сравнивают яркость эталонной лампы с яркостью измеряемого объекта, добиваясь равной яркости. Погрешность метода определяется в основном квалификацией оператора, производящего измерения.

Нулевой метод используется также для измерения скорости, силы электрического тока, напряженности магнитного поля и т. д. Погрешность данного метода определяется в основном точностью используемых электротехнических приборов, выступающих в качестве меры.

Существует ряд других методов измерения физических величин, которые широко применяются в метрологической практике, примеры которых приводятся ниже.

При измерении массы часто используют метод замещения, который дает возможность уменьшить систематическую погрешность измерения на равноплечих весах.

При линейных измерениях (в машиностроении, геодезии, радиотехнике) применяется интерференционный метод, основанный на явлении интерференции, заключающемся в сложении двух когерентных колебаний с разными фазами. В практике точных измерений широкое распространение получил фотоэлектрический метод, позволяющий уменьшить погрешность наведения на штрих по сравнению с визуальным методом в 5-6 раз.

Существует ряд физических величин, для измерения которых используют электрические методы измерения неэлектрических величин: тензометрический, индуктивный, емкостный, пьезоэлектрический и другие методы. В основе каждого из этих методов используются физические явления: изменение электрического сопротивления проводника под влиянием незначительных деформаций; изменение емкости конденсатора при малейших перемещениях пластин, изменение индуктивности катушки при малых перемещениях ее сердечника; возникновение электрических зарядов в кристаллах, подвергающихся сжатию, растяжению, вибрации.

Автоматизированные измерительные системы позволяют максимально уменьшить погрешность метода, практически ликвидировать погрешность оператора, так как эти функции выполняет сама система. Практически все автоматизированные измерительные системы имеют ЭВМ или дисплеи с выводами данных на ЭВМ и последующей их обработкой.

2 МЕТРОЛОГИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1 Температурные шкалы

Температура является важнейшим параметром оценки степени нагретости тел. С древнейших времен люди пытались найти количественную оценку теплового состояния всего, что их окружало.

В отличие от измерения длины, веса, времени прошло длительное время, пока на смену субъективным впечатлениям при определении температуры не пришли точные и единые методы измерений. Попытки наглядного представления температурных изменений (охлаждения и нагревания) известны еще с древних времен, при этом использовали для этой цели термическое расширение воздуха. Первый термометр, построенный на этом принципе, был предложен Галилеем в 1592 г. Этот прибор, названный в свое время термоскопом, не имел никакой шкалы, так что выразить его показания числом было невозможно. Термоскопы, которые делал Галилей, состояли из стеклянного шара 1 (рисунок 2.1), наполненного воздухом; от нижней части шара отходила трубка, частично заполненная водой и заканчивающаяся в сосуде 2, в которой также находилась вода.

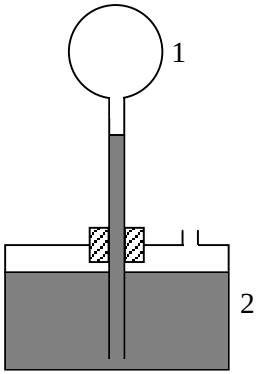


Рисунок 2.1 – Термоскоп Галилея

В теплое время воздух в шаре расширялся и уровень воды в трубке понижался, а в холодное время объем воздуха уменьшался и вода из сосуда 2 под действием атмосферного давления поднималась по капиллярной трубке. Таким образом, по высоте подъёма жидкости в трубке можно судить о степени нагретости атмосферного воздуха. Однако, высота столбика зависела не только от температуры, но и от изменения атмосферного давления и получать точные результаты измерений с помощью такого термометра было невозможно.

Более совершенный и простой термометр был предложен известным немецким естествоиспытателем Гериком, который сделал первый шаг на пути к построению температурной шкалы.

Его термометр состоял из латунного шара, заполненного воздухом, и изогнутой в форме буквы U трубки со спиртом (рисунок 2.2).

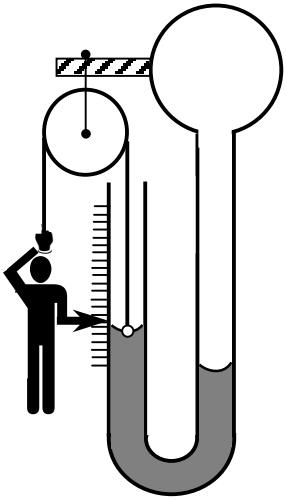


Рисунок 2.2 – Термометр Герика

Температуру в этом термометре показывал деревянный человечек, который с помощью шнура и блока был связан с латунным поплавком, плавающим в открытом конце термометра. В термометре в середине шкалы стояла точка, около которой указатель останавливался при первых заморозках, и эта точка была выбрана за начало шкалы.

Однако, идея использования газа в качестве среды, чувствительной при изменении температуры, не получила в то время распространение и вместо газовых стали использоваться жидкостные термометры.

На возможность избрать в качестве опорных точек термометра точку кипения воды и точку таяния льда указал Гюйгенс в 1655г. Как учёный он понимал, что при таком выборе можно будет сравнивать температуры ("наблюдательную степень теплоты", как он её называл) в разных местах различными термометрами, а не переносить один и тот же термометр с места на место.

В то время было установлено, что определённые процессы в одних и тех же условиях всегда протекают при одинаковых температурах, например, таяние льда или кипение воды при постоянном давлении. И в современной метрологии такие состояния вещества, в которых разные фазы (например, жидкость-лёд или жидкость–пар) при постоянной температуре находятся в равновесии друг с другом, принимаются в качестве опорных точек. Их удобно использовать в качестве калибровочных точек для температурной шкалы. Температурная шкала жидкостного термометра задаётся следующим образом: отмечается высота столба жидкости в двух опорных точках и полученный промежуток делится на несколько равных частей, каждая, из которых называется градусом (от латинского "ступенька").

Первый современный термометр был сконструирован немецким изобретателем Фаренгейтом в 1714г. Для этого термометра были выбраны две реперные (опорные) точки: температура тающего льда и самая низкая температура, примерно –18°С по современной шкале Цельсия, которая была получена Фаренгейтом в лабораторных условиях путём смешивания льда, соли и нашатыря. Этот интервал изо-

бретатель разбил на 32 части, так как его прибор оказался в 4 раза точнее, чем другие термометры, имевшие всего 8 делений на шкале (по 4 градации ощущения тёплого и холодного). По термометру Фаренгейта температура человеческого тела равнялась 96°F, а кипения воды - 212°F, при этом, разные термометры можно было сверять друг с другом, сравнивая их показания в разных "опорных" точках шкалы.

Термометры Фаренгейта получили широкое распространение благодаря своей точности и отсутствию отрицательных значений температур на шкале, и в настоящее время применяется в некоторых странах Западной Европы и Америке. Для перевода шкалы Фаренгейта в шкалу Цельсия (и наоборот), которая получила наибольшее распространение в мире, можно использовать следующие формулы:

$$°C = \frac{5}{9}(°F - 32); \quad °F = \frac{9}{5}°C + 32 \qquad (2.1)$$

Интересно отметить, что эти две шкалы имеют одну общую точку, т.е. –40°C= –40°F .

Во Франции в 1740г. в употребление вошла шкала Реомюра, построенная на точках замерзания воды (0°R) и её кипения (80°R). Такая шкала была выбрана из-за того, что вода в этом интервале по данным измерений того времени, расширяется на 80 тысячных своего объёма. Именно эти термометры были распространены в России до 1917 г. и висели на улицах и во всех домах.

Решающим шагом в области измерения температуры можно считать предложение шведского астронома Цельсия разделить интервал между точками таяния льда и кипения воды на 100 градусов. После Цельсия вопрос о выборе опорных точек и о величине градуса был решён на многие годы, и он вошёл в практику температурных измерений.

К существенным недостаткам жидкостных термометров относится зависимость показаний от рабочего вещества (воды, спирта, ртути, и др.), заполняющего термобаллон и капиллярную трубку. У термометров с различными жидкостями, прокалиброванных в опорных точках, высота поднятия столбиков жидкостей в капиллярах при одинаковых температурах различна вследствие разных зависимостей коэффициентов расширения от температуры. Так, в спиртовом термометре по сравнению с ртутным интервал между 0°C и 100°C необходимо делить неравномерно. По этой причине жидкостные термометры не годятся для определения понятия температуры и отсюда невозможно базисную величину, т.е. градус, делать зависимым от свойств определённого вещества.

В различных отраслях промышленности и в научных исследованиях в настоящее время используется очень широкий интервал температур: от тысячных градуса при изучении квантовых свойств вещества до миллионов градусов в установках термоядерного синтеза. Эти температуры надо не только создавать, но и точно измерять.

В целях дальнейшего усовершенствования температурной шкалы проводились работы по изучению возможности использования для измерения температур газового термометра. Для изготовления газовых термометров использовались реальные газы, водород, гелий и другие, т.е. такие из них, которые по своим свойствам сравнительно мало отличаются от идеального. С помощью газового термометра температура может быть измерена по изменению давления в зависимости от температуры при постоянном объеме, либо по изменению объема газа в зависимости от температуры при постоянном давлении.

В 1787 году французский химик Шарль открыл явление (которое положило началу создания новой шкалы) равномерного расширения или сжатия газа при нагревании или охлаждении. С изменением температуры на один градус Цельсия газ увеличивает или уменьшает свой объем ровно на $1/273$ того объема, который он занимал при нуле градусов. Предположим, охлаждается газ, имеющий объем 273 кубических сантиметра при нуле градусов по Цельсию. При охлаждении этого газа на один градус он потеряет $1/273$ часть своего первоначального объема, и новый объем его составит 272 $см^3$. Легко вычислить, что если газ охладить до – 273°С, то должно произойти как бы исчезновение газа. В действительности газы при охлаждении не следуют до конца закону Шарля, так как еще до достижения этой температуры они превращаются в жидкость, а закон Шарля к жидкостям неприменим.

Английский ученый Кельвин разрешил эти затруднения с "исчезновением" газа и предложил строить температурную шкалу, исходя из кинетической энергии молекул. При 0°С средняя кинетическая энергия молекул газа имеет некоторую определенную величину. С понижением температуры на каждый градус Цельсия молекулы теряют $1/273$ часть своей кинетической энергии, и убывание энергии молекул происходит совершенно равномерно. Это означает, что при температуре – 273°С или, точнее, при – 273,16°С молекулы имеют нулевую кинетическую энергию.

Следовательно, температуру –273,16°С можно считать "абсолютным нулем". Если построить новую шкалу, в которой за начало взять абсолютный нуль, а каждое деление взять равным обычному градусу Цельсия, то соотношение между этими двумя шкалами выразится формулой

$$К=°С+273,16 \qquad (2.2)$$

(До 1968 г. писали °К, а по соглашению, принятому в 1968 г., надо писать просто "К").

Развитие термодинамики в середине XIX столетия позволило дать новое, не зависящее от свойств вещества, определение температуры. Шкала, основанная на втором законе термодинамики, была предложена в середине прошлого века Кельвином и получила название "Термодинамическая температурная шкала".

В основе построения термодинамической температурной шкалы лежат зависимости между теплом и температурой, которые получены для идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_2}{T_1}\ , \qquad (2.3)$$

где Q_1 – тепло, поступающее с рабочим телом при T_1 в тепловую машину;

Q_2 – тепло, отданное рабочим телом холодильнику при T_2.

Термодинамическая температурная шкала Кельвина явилась исходной шкалой для построения температурных шкал, не зависящих от свойств термометрического вещества. В этой шкале интервал, заключающийся между точкой таяния льда и точкой кипения воды (для сохранения преемственности со стоградусной температурной шкалой Цельсия) был разделён на 100 равных частей.

Практическое измерение термодинамической температуры осуществляется газовыми термометрами, однако, такие приборы являются довольно громоздкими и сложными и для повседневных практических целей весьма неудобны. Поэтому предпринимаются попытки развить более удобные методы измерения температуры, результаты которых по возможности приближались бы к значениям термодинамической температуры, т.е. термодинамическая шкала заменяется "практической температурной шкалой". Для этого выбирается некоторое количество хорошо воспроизводимых опорных точек, термодинамические температуры которых тщательно измерены и зафиксированы при помощи газовых термометров. С помощью опорных точек градуируются приборы для измерения температуры, показания кото-

рых между опорными точками описываются хорошо известными функциями термодинамической температуры.

В настоящее время применяется Международная практическая температурная шкала (МПТШ) в редакции 1968 г. Эта шкала выбрана таким образом, чтобы температура, измеренная по этой шкале, была близка к термодинамической температуре с точностью, обеспечиваемой современными средствами измерений. МПТШ – 68 устанавливается для температур от 13,82 до 6300 К.

В качестве эталонных средств измерения для различных областей температур применяются:

- от 13,81 до 903,89 К – платиновый термометр сопротивления;
- от 903,89 до 1337,58 К – платинородий-платиновая термопара;
- от 1337,58 до 6300 К – квазимонохроматический пирометр.

В Украине кроме шкалы МПТШ – 68 установлены практические температурные шкалы, которые предназначены для осуществления единообразных измерений температуры в диапазоне от 0,01 до 100000 К. Для диапазона 0,01 до 0,8 К установлена температурная шкала термометра магнитной восприимчивости, основанная на зависимости магнитной восприимчивости термометра из церий – магниевого нитрата от температуры.

В диапазоне от 0,8 до 1,5 К установлена шкала конденсационного термометра ^{3}He, основанная на зависимости давления насыщенных паров изотопа гелия – 3 от температуры.

В диапазоне от 1,5 до 4,2 К применяется шкала конденсационного термометра ^{4}He, основанная на зависимости давления насыщенных паров изотопа гелия – 4 от температуры.

В диапазоне от 4,2 до 13,81 К применяется шкала германиевого термометра сопротивления.

В диапазоне от 6300 до 100000 К применяется шкала термометра микроволнового излучения.

2.2 Термометры расширения

Одним из основных параметров, определяющих ход технологических процессов в теплоэнергетических агрегатах (котлах, плавильных и нагревательных печах различного назначения, сушилах, газогенераторах, химических реакторах и др.) является температура.

Температурные измерения в этих агрегатах характеризуются:

- широким диапазоном измерения (от –200 до +3000 °С);

- необходимостью измерения температуры твердых, жидких и газообразных сред;

- присутствие агрессивных сред в теплоэнергетических агрегатах.

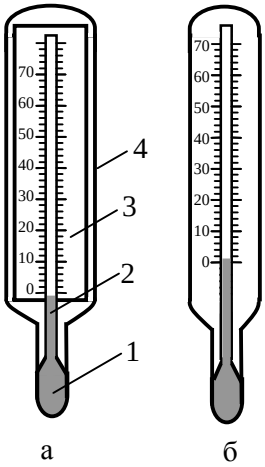
Перечисленные условия требуют применения различных методов и средств измерения температуры. В настоящее время как в научных исследованиях, так и в промышленности применяются различные способы измерения температуры, в которых используются термометрические свойства веществ. Средство измерения температуры, предназначенное для выработки сигнала в форме, удобной для восприятия наблюдателем, автоматической обработки, передачи и использования в автоматических системах управления, называется термометром. В таблице 2.1 приведены наиболее распространенные в промышленности средства измерения температуры и указаны пределы применения серийных средств измерения. В скобках указаны пределы применения средств измерения для специальных целей.

Таблица 2.1 - Температурные пределы применения промышленных средств измерения температуры

Тип средства измерения	Разновидность средства измерения	Пределы применения, °С	
		нижний	верхний
Термометры расширения	Жидкостные стеклянные термометры	-200	+750
	Манометрические термометры	-200 (-272)	1000
Термометры сопротивления	Термометры сопротивления металлические	-260	1100
	Термометры сопротивления полупроводниковые	-272	600
Термоэлектрические термометры	Термопары	-200 (-270)	2200 2800
Пирометры	Оптические пирометры	700	6000 (100000)
	Пирометры спектрального отношения	300	2800
	Пирометры полного излучения (радиационные пирометры)	-50	3500

Для измерения температур в лабораторных условиях и промышленной практике широко применяют стеклянные жидкостные термометры, являющиеся самым старым видом термометров. Они характеризуются достаточно высокой точностью, невысокой стоимостью и простотой эксплуатации.

Принцип действия термометра основан на зависимости между температурой и объемом термометрической жидкости, заключенной в стеклянной оболочке. Жидкостный стеклянный технический термометр (рисунок 2.3) состоит из термобаллона 1 (чувствительный элемент), заполненного термометрической жидкостью (ртуть, спирт и др.), капиллярной трубки 2 (измерительного устройства), пластины 3 с нанесенной на нее шкалой, наружной стеклянной оболочки 4.



1 – термобаллон;2 – капилляр; 3 – шкала; 4 – оболочка

Рисунок 2.3 - Жидкостные термометры: а – палочный; б - технический со вложенной шкалой

Температура измеряемой среды, в которую помещены резервуар (термобаллон) с жидкостью и часть капилляра, определяется по положению уровня жидкости в капилляре, длина которого отградуирована в градусах.

Для заполнения жидкостных термометров применяют ртуть, этиловый спирт, толуол, керосин, петролейный эфир, пентан, и др. Наибольшее распространение получили термометры с ртутным заполнением.

Ртуть обладает следующими свойствами: может находиться в жидком состоянии в широком диапазоне температур; верхний предел теоретически может быть доведён до 1200 ºС с помощью увеличения давления в капилляре и применения для изготовления термометра плавленного кварца; не смачивает стекла, что позволяет использовать капилляры с небольшим диаметром канала (до 0,1 мм). Все это обеспечивает хорошую точность измерения при высокой чувствительности.

При измерении высоких температур (более 200 ºС) капилляр над ртутью заполняется инертным газом (азотом) под большим давлением более 3 МПа (30 атмосфер). Верхний предел измеряемых температур ограничивается прочностными характеристиками стекла. Ртутные термометры с пределом измерения до 105ºС изготавливают вакуумными, а выше 105ºС – газонаполненными.

К числу недостатков ртути следует отнести сравнительно малый коэффициент объёмного расширения по сравнению с другими жидкостями (таблица 2.2), используемыми для заполнения термобаллона, и её токсичность в случае нарушения герметичности системы термобаллон - капилляр.

Стеклянные термометры с органическими термометрическими жидкостями применяются в интервале от –200 до 200ºС и характеризуются меньшей стоимостью и вредностью в производстве и эксплуатации. Однако, вследствие смачивания стекла эти термометры изготовляют с большим диаметром капилляра, чем у ртутных и поэтому они имеют меньшую точность измерения.

Таблица 2.2 – Термометрические жидкости для стеклянных термометров

Термометрическая жидкость	Возможные пределы измерения, ºС		Средний коэффициент объемного теплового расширения, $К^{-1}$	
	нижний	верхний	действительный	видимый *
Ртуть (Hg)	-35	750 (1200)	0,00018	0,00016
Керосин	-60	300	0,00095	0,00093
Толуол ($C_6H_5CH_3$)	-90	200	0,00109	0,00107
Этиловый спирт (C_2H_5OH)	-80	70	0,00105	0,00103
Петролейный эфир	-120	25	0,00152	0,00150
Пентан (C_5H_{12})	-200	20	0,00092	0,00090

*Под видимым коэффициентом объемного теплового расширения понимают разность между коэффициентом объемного теплового расширения термометрической жидкости и стекла.

В зависимости от метода градуировки и применения стеклянные жидкостные термометры делятся на две группы: термометры, градуируемые и применяемые при полном погружении в жидкую среду, тем-

пературу которой необходимо измерить, и при неполном погружении. Термометры первой группы применяются в основном в лабораторных условиях и позволяют обеспечить более высокую точность. Глубина их погружения должна изменяться при изменении температуры и равняться высоте подъема жидкости в капилляре. Однако, на практике не всегда обеспечивается это условие измерения, и часть столбика жидкости в капилляре может находиться вне измеряемой среды, что приводит к погрешности измерения. Эта погрешность существует когда температура выступающей части столбика термометра и части, погруженной в измеряемую среду, будет различной.

Поправка на выступающий столбик к показаниям термометра определяется в градусах по формуле:

$$\Delta t = n \cdot \beta \cdot (t - t_{в.\,ст.}) \qquad (2.4)$$

где n – число градусов в выступающем столбике, °С;

β – коэффициент видимого объемного расширения термометрической жидкости в стекле, $К^{-1}$;

t – температура, показываемая термометром, °С;

$t_{в.\,ст}$ – средняя температура выступающего столбика, измеренная вспомогательным термометром, °С.

Пример 2.1. Лабораторный ртутный термометр, погруженный в измеряемую среду до отметки 170° С, показывает температуру 350° С. Температура выступающего столбика равна 40° С. Коэффициент видимого объемного теплового расширения ртути в стекле $\beta = 0{,}00016\ К^{-1}$ (таблица 2.2). Поправка на выступающий столбик составит:

$$\Delta t = n \cdot \beta \cdot (t - t_{в.\,ст.}) = 180 \cdot 0{,}00016 \cdot (350 - 40) \approx 9°С$$

Действительное значение температуры равно 350+9=359°С.

Термометры второй группы (при неполном погружении) – технические – применяются для измерения температур в промышленности, при этом, глубина их погружения должна быть постоянной. На таких термометрах должна быть указана нормальная глубина погружения и температура $t_в$ выступающей части термометра при его градуировке. Если температура выступающей части $t'_в$ при использовании его в реальных условиях значительно отличается от температуры $t_в$ при градуировке, то для приведения показаний термометра к температуре выступающей части $t_в$ необходимо к показаниям термометра алгебраически прибавить поправку, определяемую по формуле:

$$\Delta t = m \cdot \beta \cdot (t_в - t'_в) \qquad (2.5)$$

где m – число градусов, отсчитываемое по термометру при нормальной глубине его погружения;

β – коэффициент видимого объемного расширения термометрической жидкости в стекле, $К^{-1}$;

$t_в$ – температура выступающего столбика при градуировке, °С (обычно $t_в = 20°С$);

$t'_в$ – температура выступающего столбика в реальных условиях измерения, °С.

В настоящее время выпускаются различные разновидности стеклянных термометров, отдельные из которых представлены ниже.

Лабораторные ртутные термометры для измерения температуры от –30 до +600° С, среди которых можно отметить термометры типа ТР с диапазоном от 0 до 500° С (таблица 2.3), предназначены для точных измерений температуры.

Таблица 2.3 – Характеристика лабораторных термометров повышенной точности.

Тип термометра	Область измерений, °С	Диапазон измерений, °С	Цена деления шкалы, °С	Погрешность измерений, °С
ТР–I	0–60	4	0,01	±0,01
ТР–II	55–155	10	0,02	±0,02
ТР–III	140–300	20	0,05	±0,05
ТР–IV	300–500	50	0,10	±0,10

Изготавливаются также лабораторные ртутные термометры специального назначения, которые применяются при измерении температур в какой–то одной определенной области. К этой группе относятся калориметрические и метастатические термометры. Калориметрические термометры применяются в калориметрах для определения теплоты сжигания топлива или теплоемкости тел и имеют шкалу в области комнатных температур от 15°С до 25°С с погрешностью измерения не более 0,001°С.

Метастатические термометры (термометры Бекмана) позволяют измерять небольшие разности температур (до 5°С) с погрешностью 0,004°С в широком интервале температурной шкалы от –20 до 150°С благодаря наличию дополнительного резервуара с термометрической жидкостью (ртутью). Переливая жидкость из резервуара в термобаллон и наоборот из термобаллона в резервуар, можно устанавливать пятиградусные интервалы температур (рисунок 2.4) в любом месте интервала от –20 до 150°С.

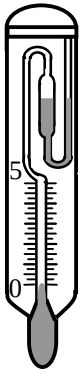
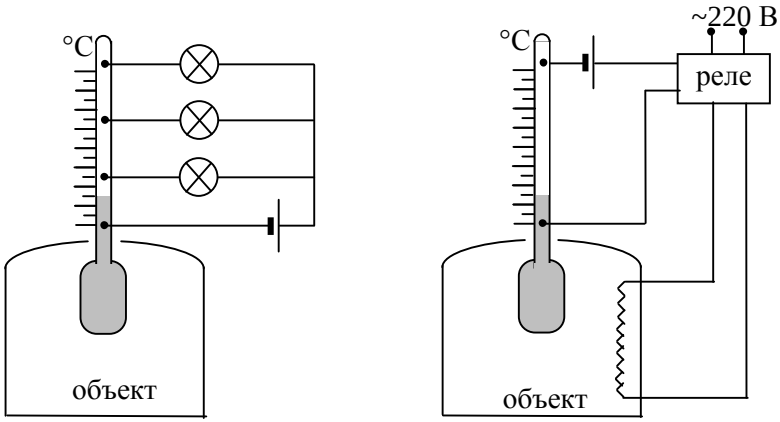


Рисунок 2.4 – Метастатический термометр

Технические ртутные термометры выпускаются 11 модификаций со шкалами, ºС: -90/+30, -60/+50, 0/100, 0/160, 0/200, 0/300, 0/350, 0/450, 0/500, 0/600. Цена деления шкалы составляет от 0,5ºС(шкала – 30/+50ºС) до 5ºС и 10ºС (шкала 0/600ºС). Форма нижней части термометра различна, их изготавливают прямыми (тип А) и угловыми (тип Б с углом 90 и 135º). При измерении температур жидких или газовых сред, находящихся под высоким давлением от 0,2 до 32 МПа (от 2 до 320 атмосфер) применяют специальные защитные оправы, которые изолируют хрупкое стекло термометра от воздействия высоких давлений.

Технические термометры электроконтактные применяются для замыкания и размыкания цепи электрического тока с целью сигнализации, регулирования (в простейших схемах) температуры в лабораторных и промышленных условиях. Принцип действия основан на способности ртути служить проводником электрического тока. Электроконтактные термометры изготавливают с постоянными впаянными контактами (рисунок 2.5) или с одним подвижным контактом, который можно перемещать внутри капилляра при помощи специального магнита и вторым неподвижным контактом, впаянным в капилляр термометра (рисунок 2.6). Термометры с подвижным контактом обеспечивают замыкание и размыкание электрической цепи при любом значении выбранной шкалы термометра. Перемещающаяся в капилляре ртуть обеспечивает электрический контакт с впаянными электродами, нагрузка на которых не должна превышать 0,5 мА при напряжении не более 0,3 В.

Специальные ртутные термометры (максимальные) применяются для фиксирования максимальной температуры атмосферного воздуха или воды в водоёмах (метеорологические термометры) или для определения максимальной температуры человеческого тела (медицинские). В этих термометрах используется несмачиваемость стекла ртутью и в месте пережима капилляра (рисунок 2.7) происходит разрыв столбика ртути при охлаждении термобаллона.



а) б)

а - в схемах сигнализации; б - в схемах регулирования

Рисунок 2.5 – Электроконтактные термометры

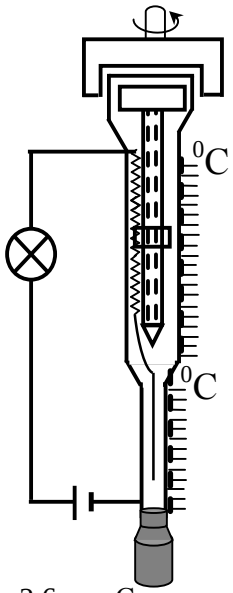


Рисунок 2.6 – Схема электроконтактного термометра с подвижным контактом

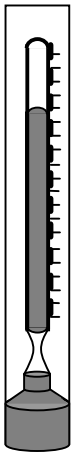


Рисунок 2.7 – Ртутный термометр максимальный

Определим чувствительность жидкостных термометров, которая согласно определению будет равна отношению изменения высоты $h_2 – h_1$ подъёма термометрической жидкости в капилляре к изменению

температуры ($t_2 - t_1$):

$$S_0 = \frac{(h_2 - h_1)}{(t_2 - t_1)}$$

Для определения S_0 запишем зависимость изменения объёма термометрической жидкости от температуры t_1 и t_2:

$$V_{t_1} = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot t_1); \qquad V_{t_2} = V_0 \cdot (1 + \beta \cdot t_2);$$

где V_0 – объем жидкости в термобаллоне при температуре градуировки (чаще при t=0°C);

β – коэффициент объемного расширения жидкости, K^{-1};

Изменение объема при увеличении температуры от t_2 до t_1

$$\Delta V = V_2 - V_1 = V_0 \cdot \beta \cdot (t_2 - t_1)$$

С другой стороны, изменения объема можно выразить через высоту подъема жидкости в капилляре:

$$\Delta V = \frac{\pi d^2}{4}(h_2 - h_1)$$

где d – диаметр капилляра термометра, м.

Приравняв правые части уравнений, получим:

$$\frac{\pi d^2}{4}(h_2 - h_1) = V_0 \cdot \beta \cdot (t_2 - t_1)$$

Отсюда чувствительность жидкостного термометра определится:

$$S_0 = \frac{4V_0\beta}{\pi d^2} = \frac{h_2 - h_1}{t_2 - t_1}$$

Как видно из этого уравнения, при необходимости использовать термометр с наибольшей чувствительностью, надо выбрать термометр с большим первоначальным объемом жидкости в термобаллоне и с маленьким диаметром капилляра. Однако, следует учитывать, что термометры с большим объемом жидкости в термобаллоне обладают большой инерционностью, что не позволяет измерять относительно быстропротекающие тепловые процессы. Термометры с малым диаметром капилляра создают трудности для визуального отсчета, и могут приводить к дополнительной погрешности из – за действия капиллярных сил.

2.3 Манометрические термометры

Принцип действия манометрического термометра основан на зависимости давления газа или жидкости, находящихся в замкнутой

системе, от температуры измеряемой среды. Манометрический термометр (рисунок 2.8) состоит из термобаллона 1, капилляра 2 и манометрической пружины 3, один конец которой соединен с капилляром, а другой, запаянный конец пружины, соединен со стрелкой измерительного прибора.

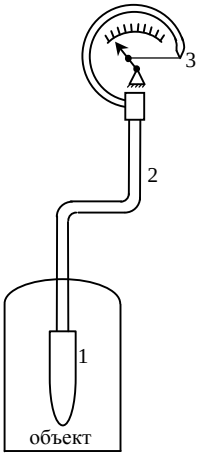


Рисунок 2.8 – Манометрический термометр

При погружении термобаллона в измеряемую среду происходит нагревание (или охлаждение) рабочего вещества, находящегося в термобаллоне, и при этом изменяется давление в термосистеме. Изменение давления рабочего вещества через гибкий капилляр передается на измерительный прибор - манометрическую пружину, свободный конец которой перемещается и поворачивает стрелку измерительной системы.

Инерционность манометрических термометров зависит в основном от теплофизических характеристик вещества в термобаллоне и его массы и практически не зависит от длины капилляра (т.е. расстояния от объекта до измерительного прибора), так как сигнал давления передается со скоростью звука в заполняемом веществе.

Манометрические термометры в зависимости от вида рабочего вещества, заполняющего термосистему, подразделяются на газовые, жидкостные и конденсационные (паровые). Термометры могут работать при температуре окружающей воздуха от 5 до 60°С и относительной влажности до 80%. Контролируемая среда (газ, продукты сгорания, агрессивные жидкости) может быть агрессивна, поэтому термобаллон выполняется из специальной стали марки Х18Н10Г. Термобаллоны рассчитаны на избыточное давление от 0,4 до 25 МПа (от 4 до 250 атмосфер). Основная допустимая погрешность не превышает ±1,0% для класса точности 1 и ±1,5% для класса точности 1,5. Дополнительная погрешность при температуре окружающего воздуха, отличной от 20°С (в пределах от 5 до 60°С), не превышает для газовых термометров 0,5 % на каждые 10°С изменения температуры.

Газовые манометрические термометры типов ТДГ–П,ТДГ–Э, ТПГ позволяют измерять температуру от –150 до + 600°С. В качестве

рабочего вещества используется азот. При постоянном объеме газа зависимость его давления от температуры определяется уравнением

$$P_t=P_0\cdot(1+\beta\cdot t), \qquad (2.7)$$

где P_0 – давление газа при температуре 0°С, Па;

β - коэффициент объемного расширения газа, $\beta=\frac{1}{273}$.

При изменении температуры газа в термобаллоне термометра от $t_{нач}$, соответствующей началу шкалы, до $t_{кон}$, соответствующей концу шкалы, будет меняться и давление газа в соответствии с уравнением:

$$P_{кон}=\frac{P_{нач}\left(1+\beta t_{кон}\right)}{1+\beta t_{нач}} \qquad (2.8)$$

После несложных преобразований получим уравнение шкалы газового манометрического термометра:

$$P_{кон}-P_{нач}=P_{нач}\cdot\frac{\beta\left(t_{кон}-t_{нач}\right)}{1+\beta t_{нач}} \qquad (2.9)$$

Из этого уравнения видно, что размах рабочего давления $\Delta P=P_{кон}-P_{нач}$ в термосистеме газового термометра прямо пропорционален значению начального давления $P_{нач}$ и диапазону измерения температур $(t_{кон}-t_{нач})$.

Колебания атмосферного давления практически не влияют на показания прибора, поскольку в термосистеме азот находится при относительно большом давлении от 0,98 до 4,9 МПа (от 9,8 до 49 атмосфер). Отклонение температуры окружающей среды от градуировочной температуры, равной $+20^0$ С, приводит к изменению температуры капиллярной трубки и манометрической пружины, в связи с чем при измерении возникает погрешность, равная

$$\Delta t=\frac{V_k}{V_T}(t_к-t_0), \qquad (2.10)$$

где $V_к$ и V_T – объем капиллярной трубки и термобаллона, $м^3$;

$t_к$ – температура капилляра.

Из формулы видно, что погрешность измерения может быть уменьшена за счет увеличения объема термобаллона. Однако чрезмерное увеличение объема приводит к возрастанию инерционности всего прибора из-за низкого коэффициента теплообмена между стенками термобаллона и наполняющим его газом, а также малой теплопроводностью самого газа.

Газовые термометры выпускаются с длиной капилляра от 1,6 до 60 метров при длине термобаллона от 125 до 500 мм и применяются

для контроля температуры охлаждающей воды, воздуха, жидкого и газообразного топлива, на установках для получения защитного газа, на кислородных станциях и на других объектах.

Жидкостные манометрические термометры типа ТЭЖ и ТПЖ предназначены для измерения температуры от –150 до +300ºС. Для заполнения термосистемы термометров применяют пропиловый алкоголь, метаксилол, силиконовые жидкости и др.

Изменение давления в зависимости от температуры для жидкости в термометре выражается уравнением:

$$\Delta P = \frac{\Delta t \beta}{\mu}, \qquad (2.11)$$

где ΔP – изменение давления, Па;

Δt – изменение температуры, К (°С);

β – коэффициент объемного расширения жидкости, $К^{-1}$;

μ – коэффициент сжимаемости жидкости, $м^2/Н$.

Для предотвращения закипания жидкости в термосистеме создается начальное давление порядка 1,5…2 МПа (15…20 атмосфер). Инерционность жидкостных манометрических термометров меньше, чем газовых благодаря большей теплопроводности жидкости. Однако, погрешности, вызванные колебаниями температуры окружающей среды, у жидкостных термометров больше, чем у газовых, и определяются по тем же формулам.

При работе жидкостных термометров необходимо учитывать гидростатическую погрешность введением поправки, которая прибавляется, если манометрическая пружина находится выше термобаллона, или вычитается, если ниже.

Пример 2.2. При измерении температуры продуктов сгорания в борове нагревательной печи термобаллон жидкостного манометрического термометра находился на 10 м ниже, чем манометрическая пружина и показывал 270°С. Определить ошибку измерения, если чувствительность прибора S_0=0,01 МПа/°С и термосистема заполнена жидкостью с плотностью ρ=895 $кг/м^3$.

Прибор будет занижать показание на величину гидростатического давления жидкости

$$P_ж = \rho \cdot g \cdot h = 895 \cdot 9{,}81 \cdot 10 = 0{,}088 \text{ МПа}$$

Ошибка измерения составит

$$\Delta t = \frac{P_ж}{S_0} = \frac{0.088}{0.01} = 8{,}8°С$$

Действительное показание прибора составит

$$t_д=270+8,8=278,8°C$$

Конденсационные (паровые) манометрические термометры типа ТП и ТКП предназначены для измерения температур от –50 до +300°С. Термобаллон термометра примерно на ¾ заполнен низкокипящей жидкостью, а остальная часть заполнена насыщенным паром этой жидкости. В качестве жидкости используются: фреон 22 (CHF_2Cl) от –25 до 80 °С, пропилен (C_3H_6) - от –50 до 60 °С, хлористый метил (CH_3Cl) – от 0 до 125 °С, ацетон (C_3H_6O) – от 100 до 200 °С, этилбензол (C_8H_{10}) – от 160 до 300 °С

Конденсационные термометры имеют большую чувствительность, чем газовые и жидкостные, однако, зависимость между температурой и развиваемым давлением в термосистеме нелинейная. Для линеаризации характеристики и, следовательно, получения равномерной шкалы некоторые типы манометрических конденсационных термометров (например ТПП2-1) снабжаются специальными устройствами (компенсаторами).

Показания конденсационных термометров зависят от высоты расположения термобаллона (выше или ниже) по отношению к манометрической пружине (к корпусу прибора), а также от изменения атмосферного давления. Изменение температуры окружающей среды практически не оказывает влияния на показания прибора, так как рабочее давление в термосистеме зависит только от диапазона измерения температуры и от изменения давления насыщенного пара от температуры.

Манометрические термометры отличаются простотой устройства, возможностью дистанционной передачи показаний (до 60 м) и возможностью их использования в пожаро– и взрывоопасных помещениях и средах. К недостаткам относятся: трудность ремонта при разгерметизации системы (особенно при повреждении капилляра), большие размеры термобаллона, а отсюда и большая инерционность.

2.4 Дилатометрические и биметаллические термометры

Работа дилатометрических и биметаллических термометров основана на свойстве твердых тел изменять свои линейные размеры при изменении температуры по уравнению:

$$\ell_t=\ell_0\cdot(1+\alpha\cdot t) \qquad (2.12)$$

где ℓ_t – длина твердого тела при температуре t, м;

ℓ_0 – длина этого же тела при температуре 0°С, м;

α – коэффициент линейного расширения твердого тела, $°C^{-1}$.

Дилатометрические термометры применяются главным образом в качестве первичных измерительных преобразователей в системах автоматического регулирования температуры, а также в системах защиты и сигнализации в различных объектов, где совершаются тепловые процессы. Термометры этого типа используются сравнительно редко для измерения температуры из – за невысокой точности и большой инерционности.

Дилатометрический термометр (рисунок 2.9) состоит из металлической трубы (чувствительного элемента) 1, внутри которой находится стержень 2.

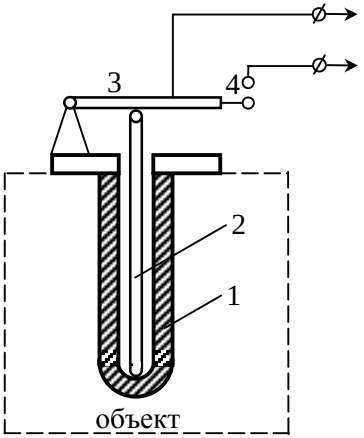


Рисунок 2.9 – Схема дилатометрического термометра-сигнализатора

Коэффициент линейного расширения трубы значительно превосходит этот показатель для стержня. В верхней части прибора размещается рычажное устройство 3 с контактной группой 4. При повышении температуры среды труба удлиняется больше, чем стержень, вследствие чего стержень, жестко скрепленный с трубой, перемещается вниз и при помощи рычага размыкает контакты при заданной температуре. Контакты термометра связаны с электрической цепью какого – либо устройства (электрической печи, сигнализатора, реле, регулирующего устройства и др.), которое включается или отключается в зависимости от установленной температуры на задатчике дилатометрического термометра. Изменение задания осуществляется путем увеличения или уменьшения, расстояние между рычагом 3 и контактом 4.

Дилатометрические термометры выпускаются на различные диапазоны температур от – 30 до 1000 ^{0} С и классом точности 1,5 и 2,5 в зависимости от модификации и интервала температур. Для изготовления металлической трубы термометра используется сталь или латунь, а стержень – из инвара, при этом, соотношение коэффициентов ли-

нейного расширения этих материалов составляет более 20, что значительно увеличивает чувствительность этих приборов.

В биметаллических термометрах (рисунок 2.10) в качестве чувствительного элемента используется термобиметаллическая пластина 1, которая состоит из двух слоев разнородных металлов, обладающих различными коэффициентами линейного расширения (например, инвар - сталь). Эти два слоя жестко скреплены между собой сваркой по всей плоскости соприкосновения. При нагревании термобиметаллической пластины последняя изгибается в сторону металла (инвара) с меньшим коэффициентом линейного расширения и при заданной температуре замыкает контакты 2. Регулирование зазора между контактами на заданное значение температуры осуществляется перемещением конца однородной металлической пластины при помощи винта 3. При увеличении зазора между пластинами увеличивается значение температуры, при которой реле может включать или отключать силовые электрические цепи.

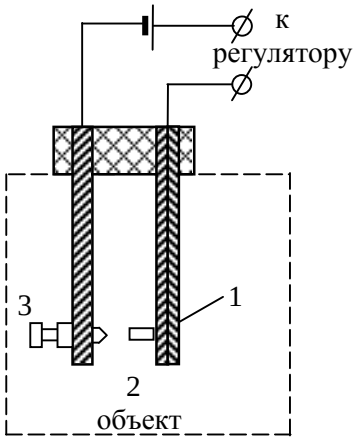


Рисунок 2.10 – Схема биметаллического реле температуры

Область применения биметаллических термометров (биметаллических реле) лежит в интервале от 60 до 300^0 С в зависимости от марки используемого биметалла.

Класс точности биметаллических термометров не превышает 2,5.

2.5 Термоэлектрические термометры

Измерение температуры с помощью термоэлектрических термометров основано на физическом явлении термо-ЭДС, которое было открыто немецким физиком Томасом Зеебеком в1821г.

В электрической цепи, состоящей из двух разнородных проводников, соединённых концами (рисунок 2.11), возникает термоэлектродвижущая сила (термо-ЭДС) при различной температуре в местах соединения проводников. Это явление можно объяснить с точки зрения

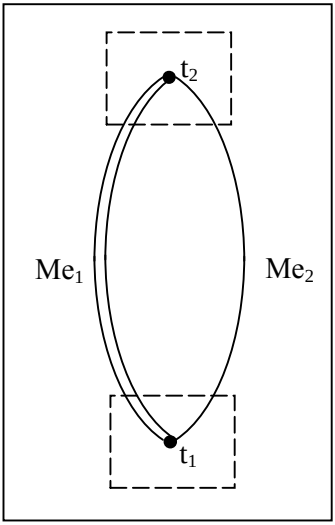


Рисунок 2.11 – Термоэлектрическая цепь

электронной теории строения металла. В каждом металле имеются так называемые "свободные" электроны, концентрация которых различна для разных металлов. При контакте двух металлов, имеющих различную концентрацию свободных электронов, произойдёт явление диффузии, т.е. электроны начнут переходить из одного металла в другой (рисунок 2.12), создавая контактную разность потенциалов. Величина возникшего потенциала будет зависеть как от природы самих металлов (т.е. различие в них свободных электронов), так и от температуры в месте контакта. Чем выше температура металла, тем интенсивнее протекает процесс диффузии электронов из одного металла в другой и поэтому более высокая разность потенциалов установится в месте соприкосновения металлов.

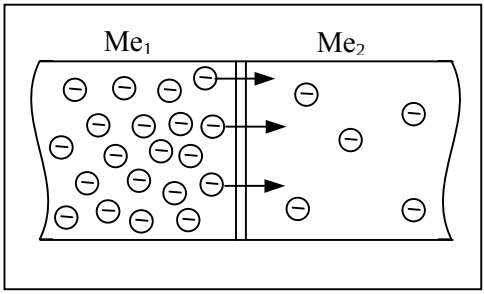


Рисунок 2.12 – Схема диффузии электронов из одного металла в другой

Если температура в местах соединения двух проводников одинакова, т.е. $t_1 = t_2$ (рисунок 2.11), то возникающие разности потенциалов в этих местах будут одинаковы, но противоположно направленными и термоток в этой электрической цепи будет равен нулю. Отсюда следует вывод, что для возникновения электрического тока в цепи, состоящей из двух металлов, необходимы два условия:

- электрическая цепь должна состоять из двух разнородных проводников;

- температура в местах соединения проводников должна быть различна, т.е. $t_1 \neq t_2$.

Возникновение контактной разности потенциалов в месте соприкосновения двух проводников можно объяснить также из теории Ферми, в которой свободные электроны в металлах характеризуются величиной энергетического потенциала. Величина потенциала отождествляется с глубиной потенциальной ямы, в которой находятся электроны. При соприкосновении двух металлов электроны будут стремится перейти (падать) из менее глубокой потенциальной ямы в более глубокую, создавая при этом контактную разность потенциалов.

Соединение двух проводников из разных металлов при различной температуре в местах соединения проводников, выполненное с целью измерения температуры газообразных, жидких и твердых сред (или получения электрической энергии) получило название " термопара " (или термоэлектрический генератор). Согласно вышеприведенному, можно записать основное уравнение термопары:

$$\Delta E = E_{t_1} - E_{t_2}, \qquad (2.12)$$

где ΔE - результирующая ЭДС, развиваемая термопарой;

E_{t_1} – ЭДС, возникающая в месте соединения при температуре t_1;

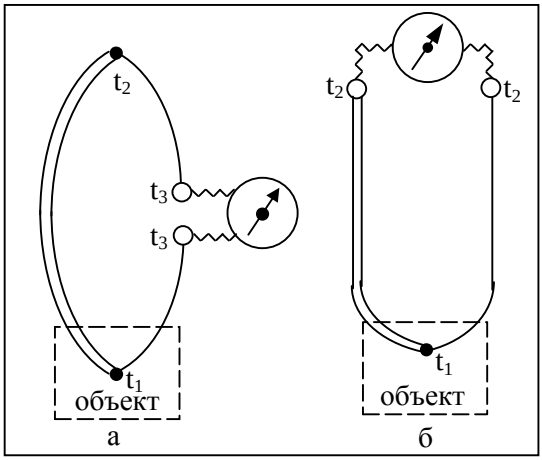
E_{t_2} – ЭДС, возникающая в месте соединения при температуре $t_2 (t_1 > t_2)$.

Результирующая ЭДС зависит от рода соединенных между собой проводников (например, медь – железо, медь – алюминий и др.) и от значения температур в местах соединения этой пары проводников. Отсюда следует важный вывод, что для однозначного измерения температуры в каком – либо месте пространства с использованием термопары необходимо стабилизировать и знать температуру в каком – либо одном месте (из двух) соединения проводников. В этом случае можно записать уравнение термопары:

$$\Delta E = E_{t_1} - \text{const} \qquad (2.13)$$

Вид функциональной зависимости $\Delta E = f(t_1, t_2)$ для конкретной пары проводников определить в настоящее время затруднительно, а поэтому эта зависимость устанавливается экспериментально методом сравнения с образцовыми термометрами. Этот процесс называется "градуировка термопары", при этом, температура одного из концов поддерживается постоянной и равной 0°С. В процессе "градуировки" получают градуировочную характеристику выбранной пары проводников (термопары), используя которую на практике, можно измерить температуру по измеренной ЭДС.

Для измерения термо-ЭДС, развиваемой термопарой, используют два способа подключения измерительного прибора: в разрыв электрода (рисунок 2.13а) и в разрыв спая, т.е. в разрыв места соединения (рисунок 2.13б) В первом случае у термопары будет четыре конца: рабочий с температурой t_1 , свободный с температурой t_2 и нейтральные с температурой t_3, причем, температуры этих двух нейтральных концов должны быть постоянными при любом их значении.



а – в разрыв электрода;
б – в разрыв места соединения

Рисунок 2.13 – Включение измерительного прибора в цепь термопары

Во втором случае у термопары будет три конца: рабочий с температурой t_1, погружаемый в среду, температуру которой необходимо измерить, и два свободных конца, которые должны находиться при постоянной температуре t_2=const.

На практике чаще используется второй вариант (б) подключения измерительного прибора в цепь термопары, что связано, в основном, с более простой конструкцией термопары, имеющей один спай (одну точку соединения), а не два, как в первом варианте.

При подключении измерительного прибора в цепь термопары образуется две новые термопары. Определим, как влияет подключение третьего проводника в цепь термопары (рисунок 2.14). Если температура во всех точках подсоединения проводников одинакова, т.е. t_1=t_2, то суммарная ЭДС, развиваемая всеми (тремя) термопарами равна нулю (по второму закону термодинамики энергию можно получить если имеется разность высот, температур, потенциалов и т.д.):

$$\Delta E = E_{1.2}^{t_1} + E_{1.3}^{t_1} + E_{2.3}^{t_2} = 0 \qquad (2.14)$$

Отсюда:

$$-E_{1.2}^{t_2} = +(E_{1.3}^{t_1} + E_{2.3}^{t_1}) \qquad (2.15)$$

При неравенстве температур, $t_1 \neq t_2$, суммарное ЭДС равно:

$$\Delta E = E_{1.2}^{t_1} + E_{1.3}^{t_2} + E_{2.3}^{t_3} \quad (2.16)$$

Подставив значение $E_{1.2}^{t_2}$ из уравнение (2.15) в уравнение (2.16), получим:

$$\Delta E = E_{1.2}^{t_1} - E_{1.2}^{t_2} \quad (2.17)$$

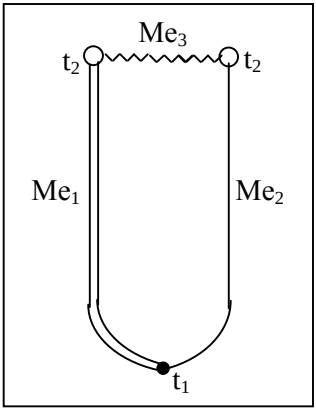


Рисунок 2.14 – Включение третьего проводника в цепь термопары

Таким образом, включение в цепь термопары третьего проводника (включение измерительного прибора при помощи третьего проводника) не оказывает влияния на суммарную ЭДС термопары при условии, что температура t_2 будет одинакова в двух точках подсоединения третьего проводника. Эти две точки должны находиться достаточно близко друг от друга, чтобы обеспечивались одинаковые температурные условия в этих точках.

Для увеличения чувствительности термоэлектрического метода измерения температуры в ряде случаев применяют термобатарею: несколько последовательно включённых термопар, рабочие концы которых находятся при температуре t_1, свободные при известной и постоянной температуре t_2 (рисунок 2.15). При таком соединении термо-ЭДС, развиваемая термопарами, суммируется, т.е. термо-ЭДС термобатареи, состоящей из n термопар, в n раз больше термо-ЭДС отдельной термопары. Термобатарея применяется при малых разностях температур между объектом и окружающей средой.

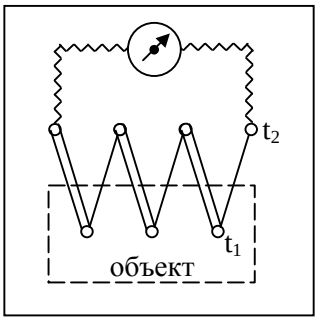


Рисунок 2.15 – Термобатарея

Термобатареи применяются также для получения электроэнергии, которая может питать малые по мощности потребители ее (например, морские буи, сигнализаторы, радиосхемы и др.).

В некоторых случаях возникает необходимость измерения разности

температур в двух точках одного тела (например, для определения теплового потока, проходящего через тело) или в двух однотипных объектах (например, в системах управления тепловыми процессами в объектах). На рисунке 2.16 показана дифференциальная термопара, когда ЭДС одной термопары включают навстречу ЭДС другой термопары.

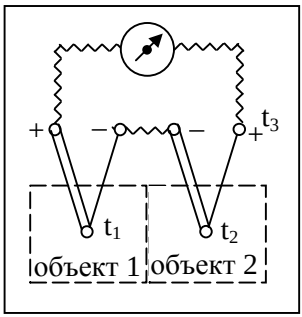


Рисунок 2.16 – Дифференциальная термопара

Термопару можно изготовить из любой пары как чистых металлов, так и их сплавов, получая бесчисленное множество устройств (термоэлектрических термометров) для измерения температуры. Однако, не все проводники могут быть использованы для изготовления термопар. К материалам, используемым для изготовления термопар, предъявляются такие требования:

- линейная характеристика, т.е. линейная зависимость между измеряемой температурой и вырабатываемой термо-ЭДС;
- стабильность характеристики в течение длительного времени работы;
- высокая жаростойкость (окалиностойкость), т.е. способность работать в условиях повышенных температур без окисления термопарных проводов;
- высокая жаропрочность (сохранение механических свойств при высокой температуре);
- химическая стойкость при работе в агрессивных средах как жидких, так и газообразных;
- однозначность характеристики в широком диапазоне температур;
- однородность термоэлектрических свойств по длине проводника;
- легкость технологической обработки материала для получения термопарного провода;
- хорошие экономические показатели.

Вышеприведенные требования резко уменьшают количество материалов, из которых можно изготовить термопары. Ниже приводятся типы термопар, принятых в соответствии со стандартами, применяемых в Украине, в России и в международной практике, а также даются их основные характеристики.

Платинородий-платиновая термопара применяется для длительного измерения температур в области от 0 до 1300°С и кратковременно – до 1600°С. Градуировочное обозначение этих термопар – ПП.

Один электрод (отрицательный) состоит из чистой платины, второй электрод (положительный) представляет собой сплав, состоящий на 10 % из родия (Rh) и на 90% из платины (Pt). Термоэлектроды этих термопар изготовляют из проволоки диаметром 0,5 мм, что удовлетворяет условиям достаточной прочности и приемлемой стоимости термоэлектродных проводов. Эти термопары сохраняют стабильность градуировочной характеристики в окислительной и нейтральной средах. В восстановительной атмосфере платинородий–платиновые термопары не рекомендуется применять, так как происходит существенное изменение градуировочной стандартной характеристики. Сильное отрицательное воздействие оказывает контакт этих термопар с углеродом и углеродосодержащими веществами (например, CO_2, CH_4 и др.), парами металлов, соединениями кремния.

Платинородий–платиновые термопары (ПП) относятся к числу лучших термоэлектрических термометров по точности и воспроизводимости термо–ЭДС, поэтому они применяются в основном в качестве эталонных и образцовых термометров. В этой функции они разделяются на следующие три разновидности: эталонные (ТПП - Э), образцовые (ТПП - О), рабочие повышенной точности (ТПП - РПТ) и технические (ТПП).

Эталонные платинородий–платиновые термопары служат для воспроизведения Международной практической температурной шкалы от 630,74 до 1064,43° С. Для этой области температуру рассчитывают по уравнению

$$E(t, t_o)=a+b\cdot t+c\cdot t^2 \qquad (2.18)$$

где a, b, c – экспериментально найденные константы (приводятся в метрологических справочниках).

Предел допустимой основной погрешности термопары ПП рассчитывается по формуле:

$$\Delta E=0{,}01+2{,}5\cdot 10^{-5}\cdot(t-300),\ \text{мВ} \qquad (2.19)$$

Платинородий–платинородиевые термопары получили большое распространение в промышленности и в лабораторной практике для длительного измерения высоких температур от 300 до 1600° С и кратковременно – до 1800° С. Положительный электрод – сплав из 30% родия и 70% платины, а отрицательный – из 6% родия и 94% платины. Градуировочное обозначение этих термопар – ПР 30/6 (цифры указы-

вают содержание родия в одном и втором термоэлектродном проводе), и они обладают теми же положительными и отрицательными характеристиками, что и термопары с градуировкой ПП. Однако, они отличаются большей стабильностью градуировочной характеристики чем термопары ПП, но при меньшем значении развиваемой ЭДС, т.е. имеют меньшую чувствительность. Предел допустимой основной погрешности термопары ПР 30/6 рассчитывается по формуле в пределах температур от 300 до 1800°С:

$$\Delta E=0{,}01+3{,}3\cdot10^{-5}\cdot(t-300),\ \text{мВ} \qquad (2.20)$$

Хромель – копелевые термопары широко применяются для измерения температур различных сред в пределах от – 50 до 600 °С. Градуировочное обозначение этих термопар ХК. Из всех существующих в настоящее время типов термопар хромель–копелевые обладают наибольшей термо-ЭДС (при температуре 600 °С они развивают более 49 мВ) а, значит, имеют наибольшую чувствительность. В качестве положительного электрода используется хромель – сплав на основе никеля (89%Ni+9,8%Cr+10%Fe+0,2%Mn), а отрицательного – копель, сплав меди и никеля (64% Cu+46% Ni). Термопары типа ХК могут эксплуатироваться как в окислительной так и в восстановительной атмосферах в указанном диапазоне измерения температур и применяются для измерения температуры продуктов сгорания в дымоотводящих трактах печей, для контроля температуры различных деталей, работающих в условиях повышенных температур и в других областях.

Хромель–алюмелевые термопары с градуировочной характеристикой ХА применяются для измерения температур от –200 до 1100° С (кратковременно можно измерять температуру 1300° С). Положительным термоэлектродом является хромелевая проволока, отрицательным служит алюмель, представляющий собой магнитный сплав на никелевой основе (94%Ni+2%Al+2,5%Mn+1%Si+0,5% примесей). Термопары типа ХА применяются для измерения температуры в рабочем пространстве тепловых агрегатов (печей, котлов и др.), температуры газовых сред, пара и жидкости. Отличительной особенностью этих термопар является достаточно высокая стабильность градуировочной характеристики при высокой интенсивности ионизирующих излучений, что позволяет использовать их при различных температурных измерениях на атомных электростанциях.

Предел допустимой основной погрешности для термопары типа ХА рассчитывается по формуле (в пределах от 300 до 1300°С)

$$\Delta E=0{,}16+2{,}0\cdot10^{-4}\cdot(t-300),\ \text{мВ} \qquad (2.21)$$

Вольфрам–рениевые термопары с градуировочной характеристикой ВР применяются сравнительно редко и предназначены для длительного измерения температур от 0 до 2200°С, кратковременно – до 2500°С. Наибольшее распространение среди этих типов термопар получила термопара ВР 5/20. Положительным термоэлектродом является сплав "вольфрам–рений" с 5% рения, отрицательным – "вольфрам–рений" с 20% рения. Термопары типа ВР применяют для измерения температуры расплавленной стали. Они могут быть использованы для измерения температуры в вакууме, в нейтральной или восстановительной среде. Пределы допустимой основной погрешности термопары типа ВР 5/30 рассчитывается по формуле (в пределах температур от 1000 до 1800 ^{o} С);

$$\Delta E=0{,}08+4{,}0\cdot10^{-5}\cdot(t-1000),\ \text{мВ} \qquad (2.22)$$

В настоящее время разрабатываются типы термопар из тугоплавких соединений для измерения высоких и сверхвысоких температур, способных работать в различных условиях (в вакууме, в сильноагрессивных средах, различных расплавах солей, щелочей, в жидких металлах и др.). Среди таких типов можно выделить следующие:

- термопары из молибдена с рением (MoRe20/40, MoRe 20/50) применяют для измерения температур в средах, содержащих углерод, т.к. и Re и Mo слабо поддаются процессам карбидизации. Верхний предел измерения температур 2200°С;

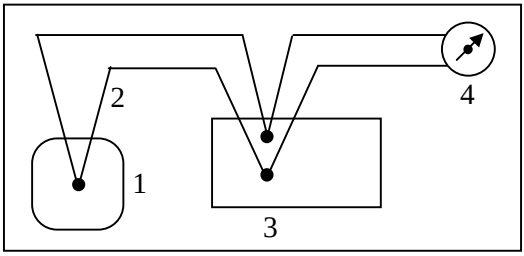
- термопары из дисилицида молибдена ($MoSi_2$), дисилицида вольфрама (WSi_2), борида циркония (ZrB_2), карбида титана (TiC) и графита (С). Например, термопара с электродами $MoSi_2$ - WSi_2 - для измерения температур до 1700°С газовых сред, некоторых расплавленных солей, стекломасс и металлов; термопара с электродами C-ZrB_2 - для измерения температур до 1800°С расплавов стали, чугуна, цветных и редких металлов; термопара с электродами С-TiC для измерения температур до 2500°С восстановительных, нейтральных, инертных газовых сред в вакууме; термопара с электродами Zr_2C–NbC (цирконий-углерод – ниобий-углерод) и NbC–HfC (ниобий-углерод – гафний-углерод) для измерения температур до 3500°С.

2.6 Способы повышения качества измерения температуры термопарами

Один из основных недостатков измерения температуры с использованием термопар является влияние температуры свободных концов

термоэлектродных проводов на точность измерения температуры в объекте. На практике применяется несколько способов устранения или уменьшения влияния изменения температуры окружающей среды на термо-ЭДС термопары.

Применение холодильника с температурой 0° С. Самым точным методом измерения температуры термопарами является помещение свободных концов термопары в специальный холодильник, где поддерживается температура 0°С (рисунок 2.17)



1 – объект измерения; 2 – термопара; 3 – холодильник; 4 – измерительный прибор

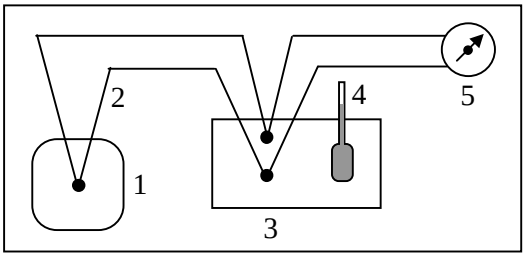
Рисунок 2.17 – Схема стабилизации температуры свободных концов термопары с использованием холодильника

Такой способ измерения не требует введения поправки на температуру свободных концов, и показание измерительного прибора принимается за действительное значение температуры в объекте.

В качестве холодильника используется небольшое изолированное от внешней среды компактное устройство, работающее на эффекте Пельтье, который является обратным эффекту Зеебека. На внутренней стенке холодильника располагается батарея термопар, свободные концы которой находятся ближе к внешней поверхности. Через батарею термопар пропускают постоянный ток, при этом, рабочие концы охлаждаются, а свободные нагреваются и таким образом внутри холодильника устанавливается температура 0° С при расчетном значении пропускаемого тока.

Применение термостата со стабильной температурой (рисунок 2.18). Если при измерении температуры не требуется повышенная точность и при этом температура в том месте, где располагаются свободные концы, не меняется заметно, то можно использовать пассивный термостат для размещения в нем свободных концов термопары. Температура в термостате должна измеряться жидкостным стеклянным термометром для введения постоянной поправки на температуру свободных концов. Ниже приводится методика расчёта поправки на температуру свободных концов термопары.

Пример 2.3. Определить поправку при измерении температуры термопарой с градуировкой ХК, если измерительный прибор показы-



1 – объект измерения; 2 – термопара; 3 – термостат; 4 – термометр; 5 – измерительный прибор

Рисунок 2.18 – Схема стабилизации температуры свободных концов термопары с использованием термостата

вает 360° С, а температура свободных концов, помещённых в термостат составляет +40° С.

Расчёт поправки проводится по следующей схеме:

- по градуировочной таблице для термопары ХК определяется термо-ЭДС при температуре свободных концов:

$$E_{t=40°C} = 2{,}66 мВ$$

- по температуре, которую показывает измерительный прибор, определяется термо-ЭДС этой же термопары:

$$E_{t=360°C}=29{,}01 мВ.$$

- определяется сумма термо-ЭДС:

$$E_{tд}=E_{t=40°C}+E_{t=300°C}=2{,}66+29{,}01=31{,}67 мВ.$$

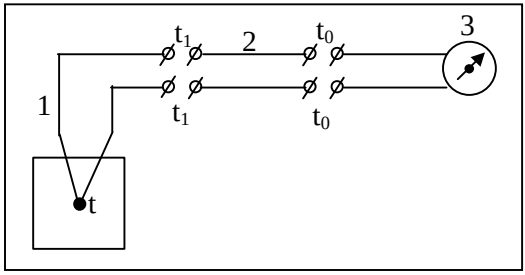
- по градуировочной таблице определяется действительное значение температуры:

$$t_д=f(E_{tд})=403\ ^0C\ .$$

Поправка для данного случая измерения температуры составляет 3°С.

Применение специальных термоэлектродных удлиняющих (компенсационных) проводов. При измерении температуры в реальных условиях производства с использованием термопар расстояние между измерительным прибором (которое часто располагается на щите управления агрегатом) и собственно термопарой составляет от нескольких до десятков метров. Если соединить термопару с измерительным прибором, например, алюминиевыми или медными проводами, то в точках соединения этих проводов и свободных концов термопар возникнут новые термопары, что приведет к появлению паразитной термо-ЭДС. Для исключения паразитных термо-ЭДС применяют так называемые удлиняющие (или компенсационные) провода, которые в паре между собой должны развивать ту же термо-ЭДС при температуре свободных концов , что и сама термопара (рисунок 2.19), т.е.:

$$E^{терм}_{(t_1,t_0)} = E^{пров}_{(t_1,t_0)} \qquad (2.23)$$



1 – термопара; 2 – удлиняющие провода; 3 – измерительный прибор

Рисунок 2.19 – Схема соединения термопары с измерительным прибором удлиняющими проводами

При подключении проводов к термопаре необходимо соблюдение полярности.

Таким образом, при применении удлиняющих проводов происходит перенос свободных концов термопары из точек с температурой t_1 (эти точки находятся в непосредственной близости от объекта, где могут происходить колебания температур примерно от 0 до 100^0C) в точки с температурой t_0, т.е. возле клемм измерительного прибора, где температура более стабильна.

Для каждого типа термопар применяются свои собственные удлиняющие термоэлектродные провода, которые подбираются из условия формулы 2.23. Рекомендуемые удлиняющие термоэлектродные провода для наиболее распространенных типов термопар приведены в таблице 2.4, где указана полярность каждого провода для правильного подключения их к соответствующим проводам термопары.

Таблица 2.4 – Рекомендуемые удлиняющие термоэлектродные провода

Тип термопары	Удлиняющие провода				Обозначение проводов
	положительный		отрицательный		
	материал	цвет оплетки	материал	цвет оплетки	
ХК	Хромель	Фиолетовый	Копель	Жёлтый	ХК
ХА	Медь	Красный	Константан	Коричневый	М
ПП	Медь	Красный	Сплав ТП (99,4%Cu+0,6%Ni)	Зелёный	ПП
ВР	Медь	Красный	Сплав МН 2,4	Синий	М-МН

Применение внешнего источника питания. Как было указано выше, повышение температуры свободных концов термопары приводит к уменьшению общей термо-ЭДС термопары и занижению ре-

зультата измерения температуры. Для компенсации потери ЭДС термопарой применяется внешний источник питания, который подключается в цепь термопары и должен компенсировать недостающую ЭДС. При этом, величина компенсирующего значения ЭДС должна в точности соответствовать той потере термо-ЭДС, которая вызвана повышением температуры свободных концов термопары и чем выше температура свободных концов, тем больше значение компенсирующей ЭДС.

Устройство внешнего источника питания, которое подключается к термопаре в районе нахождения свободных концов термопары, представляет собой мостовую схему (рисунок 2.20), три плеча R_2, R_3 и R_4 которого выполнены из манганиновой проволоки, а плечо R_4 из медной проволоки. Мост питается от постоянного источника (батарея или источник стабилизированного напряжения).

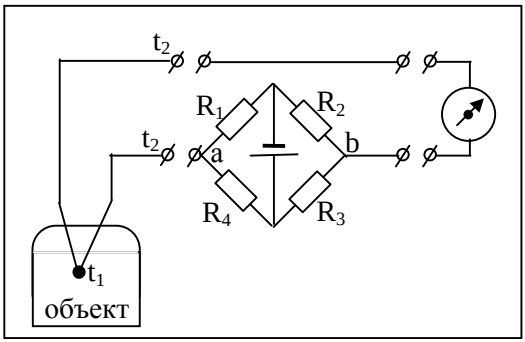


Рисунок 2.20 – Схема включения внешнего источника питания в цепь термопары

При температуре t_2=0°С мост уравновешен, напряжение U_{ab} на зажимах a и b равно нулю, а термо-ЭДС термопары соответствует градуировочному значению при температуре в объекте t_1.

При изменении температуры окружающей среды, а следовательно, и температуры свободных концов термопары до значения t_2, медный резистор R_1 также увеличивает своё сопротивление до значения R'_1. Вследствие этого нарушается равновесие моста и на зажимах a и b возникает напряжение U_{ab}, которое автоматически компенсирует уменьшение термо-ЭДС термопары. Устройства, предназначенные для этой цели, изготавливаются для термопар с градуировкой ПП, ХА, ХК, при этом погрешность компенсации при изменении температуры свободных концов термопары в пределах 0 - 50°С не превышает ±3° С.

2.7 Конструктивное выполнение термопар

Конструкция термопар зависит от многих условий в том числе от величины измеряемой температуры, от физических, химических

свойств измеряемой среды и ее состояния (твердого, жидкого, газообразного), от цели измерения и др. Однако, существуют общие требования, которым должны удовлетворять различные конструктивные элементы самой термопары:

- спай термопары (рабочий конец) должен обеспечивать хороший контакт между двумя термоэлектродами термопары;

- термоэлектроды по всей длине должны быть хорошо изолированы друг от друга с использованием керамической (Al_2O_3, SiO_2, MgO) или другой изоляции, которая была бы инертна к термоэлектродным проводам при высокой температуре;

- термопара вместе с изоляцией должна быть помещена в защитную газонепроницаемую гильзу, выполненную из жароупорной стали при измерении высоких и средних температур или из плотного картона для одноразовых термопар при измерении температуры жидких металлических расплавов (стали, чугуна и др.);

- спай рабочего конца должен иметь хороший тепловой контакт с нижней частью защитной гильзы (чехла) для уменьшения инерционности термопары. Стандартные термопары имеют следующие значения тепловой инерции: малоинерционные – 5 с, средней инерционности – до 60 с, большой инерционности – до 180 с.

- конструкция лабораторных термопар (повышенной точности) должна обеспечивать возможность термостатирования свободных концов.

В настоящее время наиболее рациональными и зарекомендовавшими себя при длительной эксплуатации в промышленности являются стандартные термопары (термоэлектрические термометры) (рисунок 2.21). Для защиты от механических повреждений и воздействий среды, температура которой измеряется, термопарные провода (термоэлектроды), изолированные друг от друга огнеупорной керамикой 2, помещаются в специальную защитную арматуру. Термоэлектроды расположены так, что их спай 1 касается защитного чехла 3. На конце защитного чехла крепится головка термопары 4. В головке расположены зажимы 5 для соединения термоэлектродов с измерительным прибором.

Рабочий спай чаще всего изготавливается путем сварки, а для вольфрам-рениевых термоэлектродов применяют скрутку. В отдельных конструкциях термоэлектроды приваривают к защитному чехлу. В качестве изоляции термоэлектродов наибольшее распространение при температурах до 1300°С получили фарфоровые одно- и двухка-

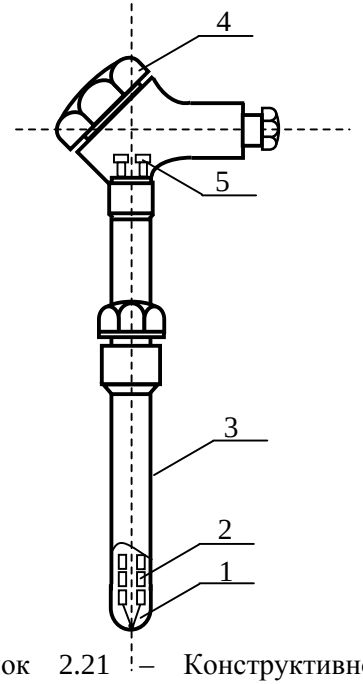


Рисунок 2.21 – Конструктивное выполнение одного из видов термопар

нальные трубки и бусы, а для более высоких температур применяют бусы из окиси алюминия (Al_2O_3).

Защитные чехлы изготавливаются чаще всего из различных марок стали для температур до 1000°С. При более высоких температурах применяются специальные чехлы из тугоплавких соединений: диборида циркония с молибденом (ZrB_2+Mo) для измерения температуры стали, чугуна и восстановительной газовой среды до 2200° С; дисилицида молибдена ($MoSi_2$) для измерения температуры расплавленного стекла и окислительной газовой среды до 1700°С.

Большое распространение в последнее время получили термопары кабельного типа (термопары типа КТМС). Они представляют собой два термоэлектродных провода, помещенных в тонкостенную металлическую оболочку. В качестве изоляционного материала, отделяющего термоэлектроды друг от друга и от оболочки, используется порошок из MgO или Al_2O_3 . Такие термопары выпускаются с маркировкой ХА и ХК при наружном диаметре оболочки от 0,5 до 6 мм при сколь угодно большой длине для измерения температуры от –200 до 1100° С.

Основными преимуществами термопар кабельного типа являются:

- возможность использования их без применения удлиняющих проводов, т.е. собственно термопару можно изготовить любой необходимой длины;

- гибкая оболочка термопары позволяет прокладывать ее в любых условиях действующего агрегата (объекта);

- применение их при давлении внешней среды до 40 МПа (400ат);

- радиационная стойкость, позволяющая им работать в энергетических реакторах атомных электростанций;

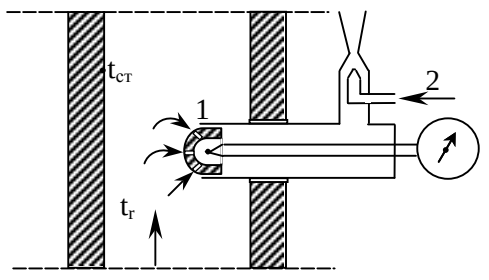
- малая инерционность и небольшой вес на единицу длины, что дает возможность эффективно использовать их в системах автоматики для управления теплоэнергетическими агрегатами с быстропротекающими тепловыми процессами (паровые котлы, паровые и газовые турбины и др.).

- повышенная стойкость к тепловым ударам, вибрациям и механическим нагрузкам.

Указанные преимущества кабельных термопар позволяют эффективно использовать их в различных промышленных установках для измерения температуры твердых, жидких и газообразных сред.

Особые трудности возникают при измерении температуры газовых сред: продуктов сгорания в боровах, воздуха на выходе из теплообменников, доменного, коксового, генераторного газа на выходе из агрегатов и др. Это связано с особенностями теплообмена в системе трех сред: стенка канала, газовая среда, спай термопары.

В реальных условиях при движении газовой среды в каналах температура газа всегда отличается от температуры стенки канала и обычная термопара покажет промежуточную температуру между $t_{ст}$ и $t_г$ (рисунок 2.22).



1 – огнеупорный экран; 2 – инжектор;

Рисунок 2.22 – Измерение температуры газовой среды отсасывающей термопарой

Для определения действительной температуры газовой среды применяют так называемую отсасывающую термопару. В этой конструкции термопары газовая среда при помощи инжектора 2 с большой скоростью (80 – 120 м/с) протекает через спай термопары и при этом значительно увеличивается конвективная теплопередача от газа к термопаре. Кроме того, спай термопары экранируется от излучения стенки канала при помощи специальной насадки 1 с отверстиями для прохода газовой среды. Отсасывающая термопара позволяет резко увеличить точность измерения температуры газовой среды.

Для работы отсасывающих термопар требуется достаточно большой расход сжатого воздуха или пара, поэтому они применяются периодически при проведении испытаний, наладочных работ теплоэнергетических агрегатов, а также для внесения поправок при определении

температуры газовых сред обычными стандартными термопарами, установленными стационарно.

Измерение температуры поверхностей. В реальных условиях эксплуатации теплоэнергетических агрегатов часто возникает необходимость контроля температуры поверхностей отдельных узлов огнеупорной кладки, горелочных устройств, балок, фурм различного назначения и др. Чаще всего для этой цели применяют так называемые поверхностные термопары. Так, на тепловых электростанциях для контроля температуры поверхностей металла барабана, выходных коллекторов пароперегревателей, отдельных змеевиков пароперегревателя и отдельных точек паропроводов парогенераторов применяют только поверхностные термопары.

При измерении температуры поверхностей необходимо выполнить два условия:

- чувствительный элемент термопары (рабочий конец) должен иметь хороший тепловой контакт с поверхностью объекта;
- термопара не должна охлаждать своим присутствием место измерения температуры.

Для обеспечения хорошего теплового контакта применяют различные способы в том числе зачеканка спая на поверхности объекта, приваривание и приклеивание рабочего конца к поверхности и другие. С целью уменьшения искажения температурного поля поверхности объекта измерения необходимо создать такие условия, чтобы не было дополнительного теплообмена в месте измерения температуры поверхности.

На рисунке 2.23 показаны различные способы измерения температуры поверхности нагретого тела с помощью термопары. Наиболее неблагоприятный вариант установки термопары показан на рисунке 2.23а. В этом случае термоэлектроды термопары отводят тепло как от рабочего конца, так и от той части поверхности, температура которой должна быть измерена. Поэтому такой способ установки не может быть рекомендован.

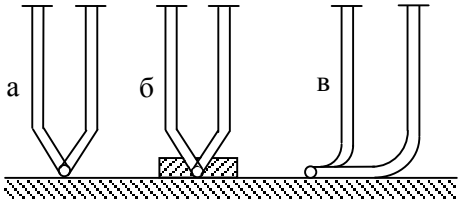


Рисунок 2.23 – Способы установки термопары на поверхности

Вариант “б” позволяет более точно измерить температуру благодаря изоляционной пластинке, которая уменьшает потери тепла от спая термопары, однако,

в этом способе утечка тепла по термоэлектродам не устраняется.

Для уменьшения погрешности за счет теплоотвода до минимума термопару необходимо устанавливать на поверхности тела (вариант “в”). В этом способе термоэлектроды прокладываются на поверхности на длину не менее 150 – 200 их диаметров. В этом случае теплоотвод непосредственно от рабочего конца термопары значительно уменьшается.

Измерение температуры металла труб паровых котлов. Основным показателем, определяющим надежную работу котлов, является температурный режим труб поверхностей нагрева. Максимальная температура обогреваемых труб не должна, исходя из условия длительной прочности, превышать допустимую температуру для данной марки стали, из которой изготовлена труба.

Температура трубы является параметром, суммирующим влияние целого ряда факторов: условий обогрева (значения и распределения теплового потока), термодинамического состояния среды и условий охлаждения (теплообмена внутри труб), состояния наружной и внутренней поверхностей, а также условий эксплуатации котла (подъем и сброс нагрузки, работа на скользящем давлении) и т. д. При этом, возникает задача измерения температуры металла труб поверхностей нагрева, расположенных в топочной камере, зоне высоких газовых температур (пароперегреватель) и конвективной шахте, зоне умеренной температуры.

Наиболее сложной задачей при этом является измерение температуры металла экранных труб в топочной камере из-за того, что рабочий спай термопары и ее выводы располагаются в среде агрессивных топочных газов, имеющих высокую температуру.

Измерение температуры металла труб пароперегревателя также является достаточно сложной задачей. В этом случае появляются дополнительные трудности, которые определяются отдаленностью точек измерения от обмуровки. Для мощных котлов это расстояние может превышать 8-10 м.

В настоящее время известны различные конструкции устройств для измерения температуры металла труб в зоне обогрева. Эти устройства принято называть температурными вставками. Все конструкции температурных вставок по принципу закладки в них горячего спая термопары можно разделить на вставки со сверлениями в стенке трубы и вставки с фрезерованной канавкой.

Вставка изготавливаются из отрезка экранной трубы Ø 32×6 мм (сталь 12Х1МФ) (рисунок 2.24). Внутри вставки 1 располагается продольная кольцевая канавка, в которой находятся термоэлектродные

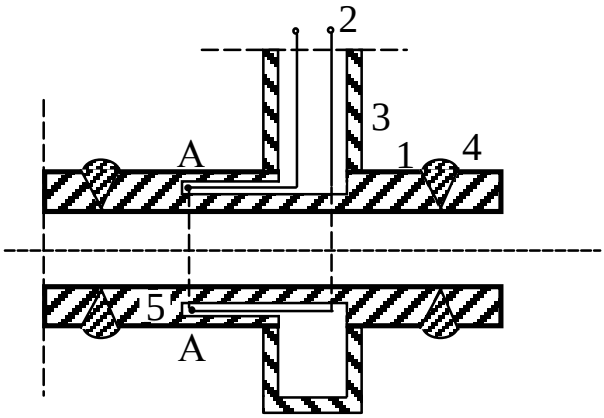


Рисунок 2.24 – Схема температурной вставки в экранной трубе для размещения термопары

провода термопары 2. Свободные концы термопары выводятся за пределы экранной трубы 4 и за пределы котла при помощи отводной трубки 3. Рабочие концы термопары размещаются в сечении А – А на расстоянии 1,5 мм от внешней поверхности трубы. Термоэлектродные провода (Ø 0,5 мм) термопары имеют градуировку ХА (хромель-алюмель) и изолируются по всей длине до рабочего конца (до спая термопары). Надежный контакт спая 5 со стенками трубы температурной вставки обеспечивают ударом керна в зоне расположения спая термопары.

Описанная конструкция вставки обеспечивает измерение температуры металла на глубине δ=1,5 мм. Температура металла на поверхности температурной вставки а, значит, и на поверхности экранной трубы, с достаточной для практических расчетов точностью может быть найдена по формуле:

$$t_{пов}=t_{изм}+\frac{q}{\lambda}\delta, \qquad (2.24)$$

где $t_{изм}$ - температура металла, измеренная на глубине 1,5мм;

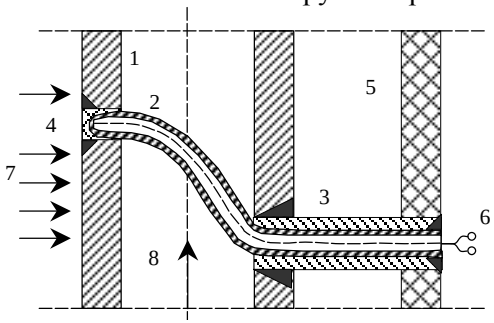
q – тепловой поток на поверхность экранной трубы, $\frac{Вт}{м^2}$;

λ – коэффициент теплопроводности металла трубы, $\frac{Вт}{м \cdot К}$.

Общая погрешность определения температуры наружной стенки трубы складывается из неточности установки термопары и пересчета, и с вероятностью 0,95 не превышает ±5°С.

В настоящее время широко применяются кабельные термопары типа КТМС в металлической оболочке из нержавеющей стали. Эти термоэлектрические преобразователи обладают рядом достоинств –

они выполнены из тонкого термоэлектрода (Ø 0.2 – 0.3 мм) и характеризуется малой инерционностью, сохраняя при этом высокую прочность и гибкость, и поэтому их следует рекомендовать при изготовлении целого ряда температурных вставок. На рисунке 2.25 показана схема установки термопары КТМС в температурной вставке экранной трубы. Такой способ измерения температуры поверхности экранных труб очень эффективен для контроля температурного состояния экранов в зоне высоких тепловых нагрузок парового котла.



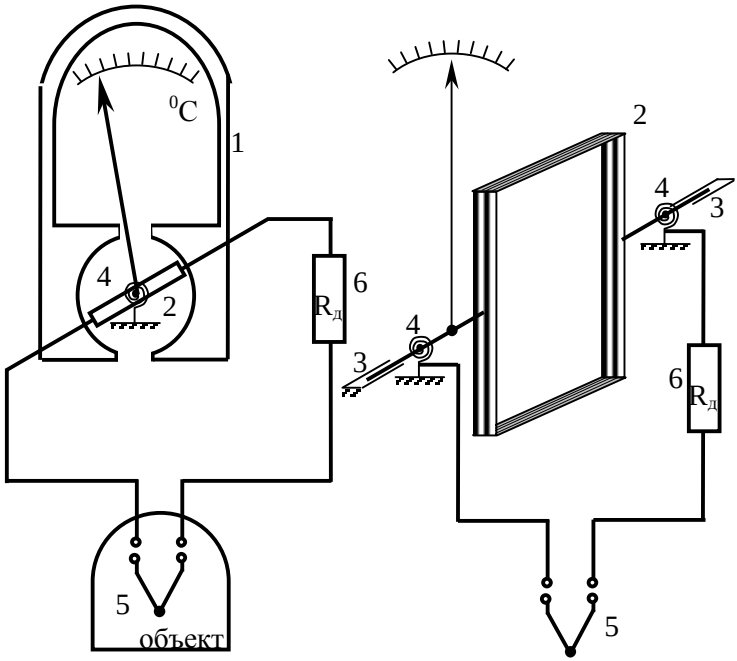
1 –температурная вставка в экранную трубу; 2 – кабельная термопара; 3 – выводная трубка; 4 –пробка; 5 – обмуровка котла; 6 – выводные концы термопары; 7 – газовая среда котла; 8 – пар.
Рисунок 2.25 – Температурная вставка для измерения температуры экранных труб в зоне высоких температур

2.8 Измерительные приборы, работающие в комплекте с термопарами

Измерение термо-ЭДС, развиваемое термопарами, производится двумя методами: прямым измерением ЭДС термопары и компенсационным.

Прямые измерения ЭДС термопары осуществляется милливольтметрами, а для компенсационного метода измерения используются потенциометры.

Принцип действия измерительного магнитоэлектрического милливольтметра основан на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и проводника с током, находящегося в этом магнитном поле. Основными частями милливольтметра (рисунок 2.26) являются постоянный магнит с полюсными наконечниками цилиндрической формы 1, выполненными из магнито-мягкой стали и подвижной рамки



а – электрическая схема;
б – подвод ЭДС термопары к рамке милливольтметра

Рисунок 2.26 – Схема магнитоэлектрического милливольтметра

2, которая состоит из нескольких десятков витков тонкой изолированной медной проволоки. Рамка, имеющая две полуоси 3, может поворачиваться в корундовых или агатовых подпятниках. Подвод тока к рамке осуществляется через спиральные пружинки 4, которые одним концом соединены с рамкой 2, а другим – с контактами, которые соединяют ее с термопарой 5.

Изменение температуры окружающей среды приводит к изменению сопротивления рамки и подводящих проводников. При постоянной термо-ЭДС термопары, это приводит к изменению тока, протекающего через рамку милливольтметра, а, значит, к изменению его показания. Для уменьшения погрешности показания прибора последовательно с рамкой включен добавочный резистор 6 ($R_д$), выполненный из манганина.

При измерении температуры в электрической цепи милливольтметра возникает ток, который, протекая через рамку прибора, создает магнитоэлектрический момент, поворачивающий рамку и величина которого зависит от термо-ЭДС, создаваемой термопарой.

$$M_т=2\cdot r\cdot \ell nB\cdot I,$$

где: 2r – ширина рамки, м;

ℓ - длина рамки, м;

n – число витков обмотки рамки;

B – магнитная индукция, создаваемая полем постоянного магнита между полюсными наконечниками, Тл;

I – ток, протекающий в рамке, А.

При повороте рамки одновременно закручиваются спиральные пружины, которые создают противодействующий момент:

$$M_{пр}=M_{уд}\cdot\varphi, \qquad (2.26)$$

где: $M_{уд}$ – удельный противодействующий момент, т.е. момент пружин, отнесенный к единице угла поворота, который зависит от материала и размера пружин, Н·м/рад

φ – угол поворота рамки, рад.

Вращение рамки будет продолжаться до тех пор, пока момент, вызванный протеканием тока через рамку ($M_т$), не уравновесится моментом при закручивании пружины ($M_{пр}$), т.е. $M_т = M_{пр}$. Приравняв два момента, найдем зависимость между углом поворота рамки и током, протекающим через рамку:

$$\varphi=\frac{2\cdot r\cdot \ell nB}{M_{уд}}I \qquad (2.27)$$

Принимая, что $2r, \ell, n, B, M_{уд}$ для данной конструкции прибора при нормальных условиях эксплуатации являются постоянными величинами и обозначив их сочетание через "k", получим:

$$\varphi=k\cdot I \qquad (2.28)$$

Ток, протекающий в рамке, зависит от ЭДС термопары и сопротивления всей электрической цепи, соединяющей прибор и термоэлектродные провода (рисунок 2.26). Значение тока для данной электрической цепи можно записать по закону Ома:

$$I=\frac{E}{R_Т+R_п+R_д+R_р}, \qquad (2.29)$$

где E – ЭДС термопары, определяемая измеряемой температурой в объекте и типом термоэлектродных поводов, мВ;

R_T – сопротивление термоэлектродных проводов термопары, Ом;

$R_п$ – сопротивление соединительных проводов, Ом;

$R_д$ – дополнительное сопротивление, Ом;

$R_р$ – сопротивление рамки милливольтметра, Ом;

Подставив значение тока I в уравнение 2.22, получим градуировочное уравнение для магнитоэлектрического милливольтметра:

$$\varphi = k \cdot \frac{E}{R_T + R_п + R_д + R_р} \qquad (2.30)$$

Для получения однозначной зависимости угла поворота рамки φ от ЭДС термопары (т.е. от температуры в объекте) необходимо, чтобы сумма сопротивлений в электрической измерительной цепи, входящая в формулу 2.24, не изменялась в процессе измерения температуры. Однако, на практике температура окружающей среды может меняться в достаточно большом интервале температур от положительных до отрицательных значений, что приводит к изменению сопротивления проводов, входящих в электрическую схему милливольтметра. В милливольтметрах, особенно применяемых в промышленных условиях, для уменьшения погрешности, вызванной отклонением температуры окружающего воздуха от нормального (градуировочного) значения, устанавливают дополнительное сопротивление, которое располагается в корпусе прибора. Величина этого сопротивления ($R_д$), выполненного из манганина , в несколько раз (4-6 раз) больше суммы всех остальных сопротивлений, что резко снижает погрешность измерения, так как $R_д \approx const$ в диапазоне от 0 до 100°С. Однако применение дополнительного сопротивления снижает чувствительность прибора, т.к. уменьшается ток, протекающий через рамку милливольтметра и ограничивает верхний предел $R_д$.

Ниже приводится пример оценки абсолютной погрешности измерения температуры среды милливольтметром в комплекте с термопарой при нормальных условиях.

Пример 2.4 Определить значение предельной абсолютной по-

грешности при измерении температуры перегретого пара, показывающим милливольтметром класса точности 0,5 со шкалой 0 - 600°С (градуировка ХА) при нормальных условиях. Милливольтметр показывает температуру пара 540°С.

Основная допустимая погрешность милливольтметра составит:

$$\Delta t_м = \frac{0{,}5 \cdot 540}{100} = \pm 2{,}7^0 C .$$

Допускаемое отклонение градуировочной характеристики термопары типа ХА, рассчитанное по формуле (2.21), равно:

$\Delta E_т = \pm[0{,}16 + 2{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot (t - 300)] = \pm[0{,}16 + 2{,}0 \cdot 10^{-4} \cdot (540 - 300)] = \pm 0{,}21$ мВ,

что соответствует по градуировочной характеристике (приложение Д) $\Delta t = \pm 5{,}3$°С.

Допускаемое отклонение ЭДС компенсационных проводов работающих в комплекте с термопарой ХА, равно $\Delta E_{т.р.} = \pm 0{,}15$мВ, что соответствует (приложение Д) $\Delta t_{к.п.} = \pm 3{,}8$°С.

Предельная погрешность измерения температуры составит:

$$\Delta t = \pm\sqrt{(\Delta t_м)^2 + (\Delta t_т)^2 + (\Delta t_{к.п.})^2} = \sqrt{2{,}7^2 + 5{,}3^2 + 3{,}8^2} = \pm 7{,}058^0 C \approx \pm 7^0 C$$

Применяемая в этом примере методика оценки предельной погрешности показаний для измерительного комплекта (милливольтметр – термопара – компенсационные провода) хорошо согласуется с опытными данными.

Милливольтметры, применяемые для измерения термо-ЭДС термопар, по функциональному назначению могут быть показывающими, самопишущими и регулирующими. По конструктивному исполнению приборы бывают щитовыми и переносными. Для переносных приборов установлены следующие классы точности: 0,2; 0,5; 1,0, а для щитовых –0,5; 1,0; 1,5. На шкале милливольтметра указывается градуировка термопары (или пирометра), в комплекте с которым должен работать данный милливольтметр. Внутреннее сопротивление милливольтметра для класса точности 0,2; 0,5; 1,0; 1,5 должно быть не менее 500; 300; 200 Ом. Внешнее сопротивление милливольтметров, предназначенных для работы с термопарами, должно быть равно 5 или 15 Ом.

2.9 Компенсационный метод измерения термо-ЭДС термопары

Компенсационный метод получил широкое распространение при измерении температуры с использованием термопар. Суть метода заключается в уравновешивании (компенсации) ЭДС термопары известным напряжением, создаваемым посторонним источником. Этот метод позволяет измерять термо-ЭДС более точно, так как в момент измерения ток в цепи термопары равен нулю и исключается погрешность, связанная с влиянием температуры окружающей среды на сопротивление внешней цепи. Приборы, использующие данный принцип, получили название «потенциометры».

На рисунке 2.27 показана простейшая схема потенциометра, которая состоит из делителя напряжения R, источника питания Б, нуль-гальванометра НГ и термопары Т.

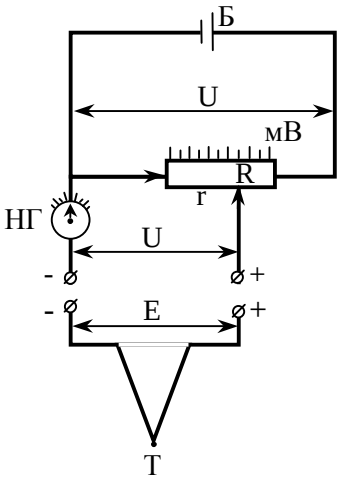


Рисунок 2.27-Компенсационный метод измерения термо-ЭДС

При измерении температуры термопара развивает ЭДС, которая подключается навстречу напряжению U, снимаемому с части r делителя напряжения. Перемещая движок делителя, можно найти положение, когда E=U. В этом случае термо-ЭДС E будет уравновешена падением напряжения U на участке r делителя напряжения, и ток в цепи термопары будет отсутствовать. Стрелка нуль-гальванометра покажет ноль. Главное преимущество компенсационного метода заключается в том, что сопротивление термопары и подводящих проводников не оказывают влияния на измерение, что выгодно отличает этот способ измерения от способа с использованием милливольтметра, рассмотренного выше. Поэтому компенсационный метод получил широкое распространение при измерении термо-ЭДС термопар, имеющих различную градуировку и различное собственное сопротивление.

Точность измерения ЭДС термопары компенсационным методом зависит от стабильности тока в цепи делителя напряжения, т.е. вели-

чина тока определяет стабильное значение напряжения, снимаемое с любой точки делителя, так как U=I·r. Для более эффективного использования преимущества компенсационного метода необходимо, чтобы через делитель напряжения протекал один и тот же ток (градуировочный). С этой целью используется электрическая схема, в которой имеется контрольный источник напряжения, так называемый «нормальный элемент», при помощи которого можно устанавливать градуировочный ток в цепи делителя напряжения. Такая схема получила название «потенциометр с постоянной силой рабочего (градуировочного) тока в цепи делителя напряжения» (рисунок 2.28).

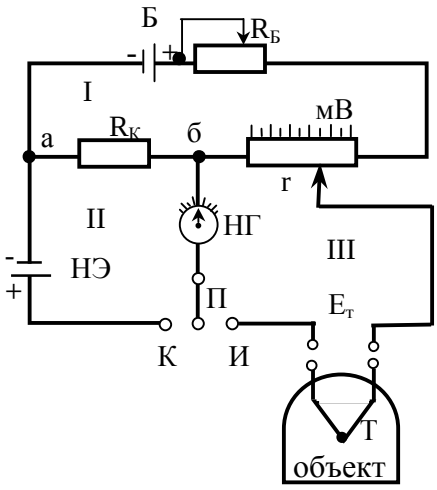


Рисунок 2.28 – Потенциометр с постоянной силой рабочего тока

Потенциометр состоит из трех контуров: измерительного I, нормального элемента II, и термопары III. Прибор питается от источника питания Б, значение рабочего тока которого может изменяться переменным резистором $R_Б$. Для точной установки рабочего тока падения напряжения на резисторе $R_к$ сравнивается с ЭДС нормального элемента. Нормальный элемент – это электрохимический источник с постоянным значением ЭДС, величина которого равна 1,0186 В и не меняется в течение длительного времени. Однако нормальный элемент имеет малую мощность и его можно использовать только как контрольный источник напряжения, т.е. он применяется как эталон постоянной ЭДС.

Перед тем, как измерить температуру, устанавливают стандартное (градуировочное) значение тока при помощи сопротивления $R_Б$. Переключатель П стоит в этом случае в положении К – контроль. Перемещая движок сопротивления $R_Б$, устанавливают стрелку нульгальванометра в нулевое положение, что соответствует равенству ЭДС нормального элемента падению напряжения на резисторе $R_к$, т.е.

$$E_{н.э.} = U_{аб} \qquad (2.31)$$

Так как $U_{аб} = I R_к$, где I – ток в контуре 1, то в этом контуре уста-

новится стандартное значение тока, равное

$$I = \frac{E_{н.э.}}{R_к} = \text{const} \qquad (2.32)$$

После операции стандартизации рабочего тока I переключатель П переводят в положение И – измерение, при этом, нуль-гальванометр включается в контур термопары. В этом случае сравнивается ЭДС термопары с падением напряжения на участке r делителя напряжения $R_р$ Перемещая движок $R_р$, добиваются установления стрелки нуль-гальванометра в нулевую позицию. При этом, наступает полная компенсация неизвестного значения ЭДС термопары $E_т$ известным потенциалом на сопротивлении r, т.е.

$$E_т = I \cdot r \qquad (2.33)$$

Таким образом, стрелка движка на реохорде (другое, более известное, название делителя напряжения), которое отградуировано по длине в милливольтах, укажет на значение ЭДС термопары. Зная по таблице градировочную характеристику данного типа термопары, определяют значение температуры в объекте.

Применение потенциометра с постоянной силой рабочего тока для измерения термо-ЭДС имеет следующие преимущества:

- независимость показаний от изменения сопротивления внешней цепи;
- повышение точности измерения за счет повышения точности установки рабочего тока (точность установки определяется точностью $E_{н.э}$ и $R_к$, погрешность которых не превышает соответственно 0,01% и 0,02%). Предельная погрешность потенциометров составляет 0,05% и менее.

На практике получили большое распространение автоматические потенциометры, которые исключают участие человека в проведении операций компенсации входного сигнала термопары. Измерительная схема автоматического потенциометра не отличается принципиально от схемы потенциометра с ручным уравновешиванием.

На рисунке 2.29 приведена упрощенная схема устройства автоматического потенциометра. ЭДС термопары $E_т$ сравнивается с компенсирующим напряжением $U_к$, снимаемым с диагонали c-d неуравновешенного измерительного моста. Мостовая измерительная схема является более совершенной и позволяет автоматически вводить поправку на температуру свободных концов термопары. Введение поправки осуществляется добавлением в схему медного резистора $R_м$, температура которого равна температуре свободных концов термопары.

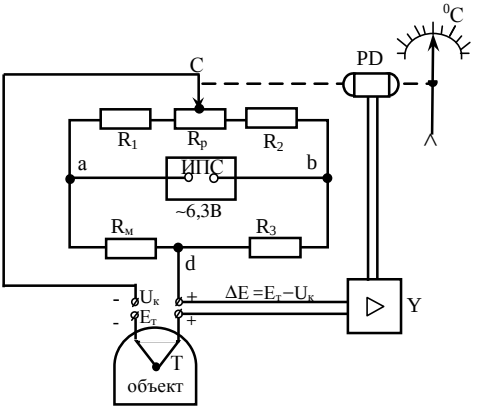


Рисунок 2.29 – Упрощенная измерительная схема автоматического потенциометра

Падение напряжения на резисторе $R_м$ в точности равно ЭДС термопары (конкретной градуировки) при температуре ее свободных концов. Таким образом, автоматически вводится коррекция на изменяющуюся температуру свободных концов термопары за счет дополнительного напряжения, снимаемого с резистора $R_м$. При измерении температуры в объекте, на вход усилителя подается разность потенциалов, которая равна:

$$\Delta E = E_т - U_к \qquad (2.34)$$

Усиленный сигнал подается на реверсивный двигатель РД, который одновременно перемещает движок реохорда $R_р$ и стрелку прибора. Перемещение движка $R_р$ будет происходить до тех пор, пока ΔE не станет равной нулю. При этом, двигатель остановится и по положению стрелки на шкале прибора измеряется температура в объекте. Таким образом, любые изменения ЭДС термопары приводят к перемещению движка реохорда $R_р$, т.е. прибор непрерывно автоматически компенсирует измеряемый сигнал известным напряжением на части реохорда.

Автоматические потенциометры выпускаются различных модификаций: показывающие (типа КВП1, КПП1); самопишущие с ленточной или круглой диаграммой (типов КСП4, КСП3); одно- и многоточечные (2, 3, 12 каналов); малогабаритные (типа КСП2); миниатюрные (типа КСП1); регулирующие, с выходными устройствами дистанционной передачи показаний; с различным временем пробега стрелки всей шкалы (в секундах: 1,0; 2,5; 5; 10; 16)

Класс точности серийных автоматических потенциометров 0,25; 0,5; 1,0. Градуировка шкалы выполняется либо в градусах Цельсия с одновременным указанием на шкале типа применяемой термопары или радиационного термометра, либо в милливольтах.

Ниже на рисунке 2.30 приведена типовая принципиальная схема одноточечного автоматического потенциометра. На этой схеме приняты следующие обозначения: $R_р$ - реохорд, $R_ш$ – шунт реохорда, служащий для подгонки сопротивления реохорда до заданного нормированного значения, $R_о$ - токоотводящий реохорд; $R_п$ – резистор для установления диапазона измерения температуры; $R_н$ – резистор для установления начального значения шкалы; $R_б$ – резистор балластный, для установки при различных градуировках определенного значения сопротивления верхней ветви измерительной схемы; $R_м$ – вспомогательный резистор из медной проволоки для автоматического введения поправки на изменение ЭДС термопары при изменениях температуры его свободных концов; $R_к$ – контрольный резистор с сопротивлением 509,5 Ом для всех выпускаемых потенциометров, служащий для контроля рабочего тока в измерительной схеме при градуировке прибора или его поверке; ИПС – источник питания стабилизированный; R′ R″ – резисторы в цепи ИПС для ограничения и регулировки рабочего тока при градуировке или поверке прибора; сопротивления $R_{ф1}$,$R_{ф2}$, $R_{ф3}$ и конденсаторы C_1, C_2, C_3 образуют фильтры, устраняющие наводки и помехи, возникающие в проводах между термопарой и потенциометром под действием внешних электромагнитных полей; ВП – вибропреобразователь для преобразования сигнала разбаланса в переменное напряжение; У – электронный усилитель; РД – реверсивный двигатель; 1-2 – зажимы, к которым при градуировке прибора или

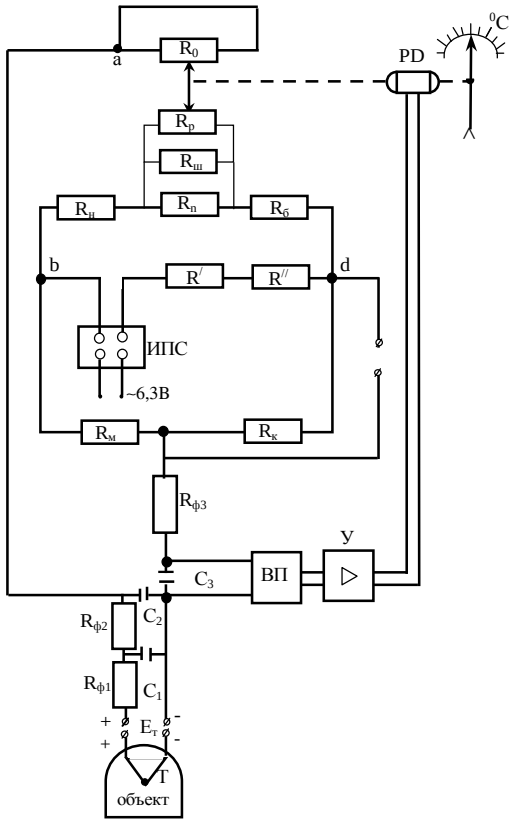


Рисунок 2.30 – Полная измерительная схема автоматического потенциометра

его поверке присоединяют нуль-гальванометр и нормальный элемент.

Все резисторы измерительной схемы автоматических потенциометров, кроме $R_м$, изготавливают из стабилизированной манганиновой проволоки. В потенциометрах, работающих в комплекте с термопарами градуировок ПП, ХА, ХК и других, резистор $R_м$ находится в непосредственной близости от свободных концов термопары.

Реохорд автоматического потенциометра является ответственным узлом. Основные элементы реохорда – рабочая спираль $R_р$ и токоотвод $R_о$ (вспомагательная спираль). В потенциометрах типа КПП, КСП и других, выпускаемых в настоящее время, рабочую и вспомогательную спирали изготовляют из сплава палладия и вольфрама, который обладает большой стойкостью против истирания и окисления по сравнению с реохордом из манганиновой проволоки. Для повышения надежности работы движок реохорда снабжается контактами, выполненными из сплава золото-серебро-медь. Надежность контакта, а, следовательно, и работа реохорда обеспечивается также чистотой контактных поверхностей, защитой от загрязнений и необходимым контактным давлением.

Работа автоматического потенциометра осуществляется следующим образом. ЭДС термопары уравновешивается падением напряжения на участке "a–c". Это уравновешивание происходит автоматически. Если $U_{ac} \neq E_т$, то на вход электронного усилителя поступает разность сигналов $\Delta E = U_{ac} - E_т$, которая усиливается по напряжению и по мощности. Результирующий выходной сигнал электронного усилителя поступает на реверсивный двигатель РД, который перемещает движок реохорда $R_р$ таким образом , что ΔE начинает уменьшаться до нуля, т.е. $U_{ac} = E_т$. При этом, реверсивный двигатель остановится и стрелка измерительного прибора, механически связанная с двигателем, укажет измеренную температуру.

Автоматические потенциометры типа КСП могут осуществлять дистанционную передачу показаний реостатными датчиками или с помощью пневматических, токовых, частотных и ферродинамических преобразователей. В приборы отдельных модификаций встраиваются сигнализирующие и регулирующие устройства. Средний срок службы приборов до среднего ремонта не менее 10 лет.

Наряду с автоматическими потенциометрами, использующими компенсационную измерительную схему с реохордом, выпускаются автоматические безреохордные потенциометры. В этих приборах также используется компенсационный принцип измерения ЭДС термопары, но компенсирующее напряжение, зависящее от угла поворота вы-

ходного вала исполнительного механизма, вырабатывается бесконтактным устройством. Упрощенная схема автоматического безреохордного потенциометра представлена на рисунке 2.31.

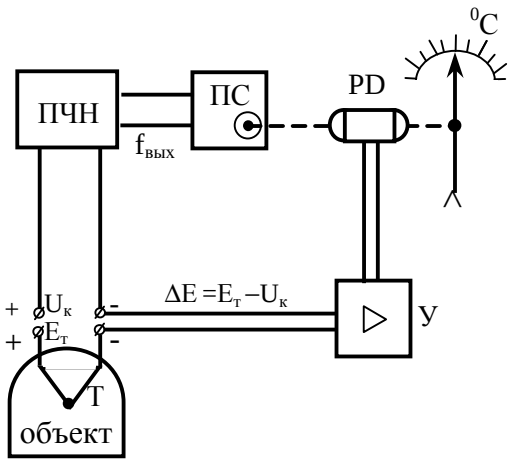


Рисунок 2.31 – Упрощенная схема автоматического безреохордного потенциометра

Основным элементом прибора является электронный блок ПЧН – преобразователь частотного сигнала $f_{вых}$ в компенсирующее напряжение $U_к$ постоянного тока. При равенстве $U_к$ и измеряемой термо-ЭДС термопары исполнительный механизм следящей системы потенциометра находится в покое. Если измеряемая ЭДС термопары не равна компенсирующему напряжению $U_к$, то сигнал разбаланса $\Delta E = E_т - U_к$ подается на вход усилителя, где преобразуется в напряжение переменного тока и усиливается до значения, достаточного для приведения в действие реверсивного двигателя. Вал реверсивного двигателя поворачивает ось преобразователя сигнала ПС, который вырабатывает выходной сигнал $f_{вых}$, пропорциональный углу поворота входной оси. Этот сигнал поступает на вход электронного блока ПЧН, где преобразуется в напряжение постоянного тока $U_к$.

Вал реверсивного двигателя поворачивает входную ось преобразователя ПС и перемещает указатель на шкале до тех пор, пока компенсирующее напряжение $U_к$ не будет равно измеряемой ЭДС термопары.

Автоматические безреохордные потенциометры пока не получившие широкого распространения, имеют достаточные перспективы применения из-за основного преимущества перед остальными приборами – это отсутствие дорогостоящего и часто ненадежного реохорда. Приборы выпускаются в виде миниатюрных одноточечных показывающих и самопишущих аппаратов типа ЭПП и ЭПС, имеющих класс точности 0,5 и 1,0.

Потенциометры могут быть снабжены следующими дополнительными устройствами: одним или двумя передающими преобразователями типов ПФ, ПС или ПП; сигнализирующим (регулирующим)

четырехконтактным устройством, позволяющим осуществлять предварительную и аварийную сигнализацию, двухпозиционное регулирование и другие операции.

2.10 Термометры сопротивления

Принцип действия термометров сопротивления основан на использовании зависимости электрического сопротивления различных материалов (в первую очередь металлов) от температуры. Зная данную зависимость, по изменению величины сопротивления термометра, судят о температуре среды, в которую он погружен.

В качестве материалов для изготовления чувствительных элементов термометров сопротивления используются чистые металлы: платина, медь, никель и полупроводники. Электрическое сопротивление металла увеличивается с повышением температуры в связи с возрастающим хаотическим движением свободных электронов, обусловленное увеличением тепловых колебаний атомов около своих положений равновесия. В полупроводниках, в отличие от металлов, электрическое сопротивление уменьшается при увеличении температуры, что связано с резким возрастанием числа электронов проводимости.

К материалам (металлам и полупроводникам), применяемым для изготовления термометров сопротивления, предъявляются обязательные требования – это стабильность градуировочной характеристики и воспроизводимость результатов измерения в течение длительного времени. Остальные характеристики, такие как высокая чувствительность, линейность градуировочной характеристики, большое удельное сопротивление и другие являются желательными.

Из большого числа чистых металлов и сплавов для изготовления термометров сопротивления в настоящее время применяются высокочистые медь, платина, никель.

Медные термометры сопротивления типа ТСМ применяются для длительного измерения температуры от –200 до $+200^0$С. Сопротивление меди изменяется практически линейно при изменении температуры:

$$R_t = R_o (1 + \alpha_t), \qquad (2.35)$$

где R_t, R_o – сопротивление термометра при температуре t и 0^0С;

α – температурный коэффициент электрического сопротивления медной проволоки, $\alpha = 4{,}28 \cdot 10^{-3}$ К$^{-1}$.

К достоинствам меди следует отнести низкую стоимость, линейную зависимость сопротивления от температуры, возможность получения тонкой проволоки высокой чистоты и в различной изоляции.

Недостаток медных термометров сопротивления заключается в малом удельном сопротивлении (ρ_0=0,0155·10^{-6} Ом·м) и значительным окислением меди при высоких температурах из-за разрушения изоляции. По точности измерения температуры медные термометры сопротивления подразделяются на два класса: II и III, с номинальным сопротивлением при 0^0С, которое составляет 53 и 100 Ом и которым присвоено обозначение градуировки соответственно гр 23 и гр 24. Допускаемое отклонение сопротивления ТСМ от номинального значения для обоих классов точности составляет ±0,1%, а предел допускаемой основной погрешности для термометров II класса равен 0,5 °С, и III класса – 2 °С.

Платиновые термометры сопротивления (ТСП) используются для измерения температуры от –260 до +750 °С, а в отдельных случаях, например, в метрологической практике, до 1100 °С. Чистая платина в наибольшей степени отвечает всем основным требованиям, предъявляемым к металлам для изготовления чувствительного элемента термометров сопротивления. Это позволяет считать платиновый термометр сопротивления наиболее точным из числа первичных преобразователей, предназначенных для измерения температур в указанной области для этих приборов. К недостаткам платины следует отнести отклонение от линейного закона зависимости ее сопротивления, от температуры. Например, для интервала температур от 0 до 630 °С эта зависимость может быть описана выражением

$$R_t = R_o (1 + A \cdot t + B \cdot t^2), \qquad (2.36)$$

а на интервале от –183 до 0 °С – выражением:

$$R_t = R_o [1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 (t - 100)] \qquad (2.37)$$

Постоянные А, В, С определяются в точках кипения воды, серы и кислорода и используются при градуировках термометров сопротивления.

Платиновые термометры сопротивления изготавливаются со следующими сопротивлениями при 0^0С: 1, 5, 10, 50, 100, 500 Ом, которым присвоены следующие условные обозначения номинальной статической характеристики преобразования: 1П, 5П, 10П, 50П, 100П и 500П. Термометры с низким электрическим сопротивлением (1П, 5П, 10П) применяются в основном для измерения высоких температур, а с более высоким – для измерения низких температур.

Платиновые термометры сопротивления в зависимости от их назначения разделяются на три основные группы: эталонные, образцовые (1-го и 2-го разрядов) и рабочие (технические и лабораторные).

Технические термометры предназначаются для длительного измерения температуры от –200 до 650 ^{0}C с номинальными значениями сопротивлений при 0^{0}C (R_0), равными 10, 46, 100 Ом, которым присвоено обозначение градуировки соответственно гр20, гр21, гр22.

Никелевые термометры сопротивления (ТСН) имеют перспективу применения, т.к. обладают высоким температурным коэффициентом электрического сопротивления и большим удельным сопротивлением, что позволяет изготовлять достаточно малогабаритные термометры с малой инерционностью. Разработаны и применяются термометры 3-го класса для измерения температуры в диапазонах от –60 до +180 ^{0}C. К числу недостатков никеля следует отнести значительную окисляемость при высоких температурах и большую зависимость температурного коэффициента сопротивления от степени чистоты металла. Кроме того, зависимость сопротивления никеля от температуры имеет резко нелинейную характеристику (рисунок 2.32).

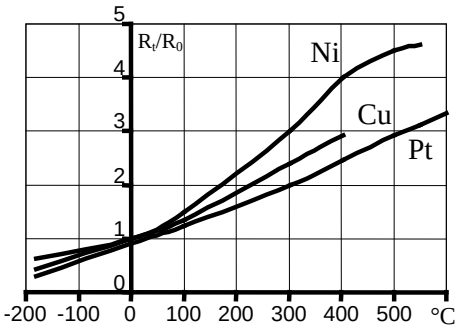


Рисунок 2.32 – Зависимость отношения R_t/R_0 для никеля, меди и платины от температуры

Кроме металлов для изготовления термометров сопротивления применяют полупроводниковые материалы: германий, окислы меди, марганца, кобальта, магния, титана и их смеси. Большинство полупроводниковых термометров сопротивления обладает большим удельным сопротивлением, поэтому можно изготавливать очень малые по размерам чувствительные элементы.

Зависимость сопротивления полупроводникового термометра сопротивления определяется выражением:

$$R_T = R_0 \cdot \exp\left(B \frac{T_0 - T}{T_0 \cdot T} \right), \qquad (2.38)$$

где R_o – сопротивление термометра при T_o=293К;

B – коэффициент, зависящий от материала полупроводника, из которого изготавливается термометр.

Наибольшее распространение получили германиевые термометры сопротивления для измерения криогенных температур от 1,5 К до

90 К. Пределы допускаемых погрешностей рабочих термометров составляют от ±0,05 до ±0,1. Эталонный германиевый термометр сопротивления воспроизводит и хранит единицу температуры в диапазоне от 4,2 до 13,81 К.

Для измерения температур от –100 до $+300^0$С применяются окисные полупроводниковые термометры сопротивления (терморезисторы). Форма и виды изготавливаемых чувствительных элементов терморезисторов зависит от способа и условия их применения. Наиболее распространенными видами терморезисторов являются цилиндрические, шайбовые и бусинковые, что делает их малоинерционными и пригодными для измерения быстропротекающих тепловых процессов. Кроме того, полупроводниковые термометры сопротивления можно использовать в качестве бесконтактных температурных сигнализаторов (термореле). Это вызвано тем, что они обладают способностью изменять свое сопротивление скачкообразно в несколько раз при достижении определенной температуры, что вызывает соответствующее увеличение тока и срабатывание системы сигнализации.

Широкое использование полупроводниковых термометров сопротивления ограничивается рядом недостатков, которыми они обладают. К ним, прежде всего, относится отсутствие взаимозаменяемости изготавливаемых в настоящее время терморезисторов из-за большого разброса характеристик даже для одного и того же типа термометра. Это исключает возможность получения единой градуировочной таблицы для данного типа термометра. Кроме того, нелинейный характер зависимости электрического сопротивления от температуры, нестабильность характеристики, влияние условий измерения температуры данной среды приводят к дополнительной погрешности измерения температуры.

Перспективным направлением в области конструирования термометров сопротивления является использование тонкопленочной технологии для изготовления чувствительных элементов термометров. Особенностью технологии является напыление тонкого слоя металла заданной конфигурации на изолирующую подложку. В качестве материала для изготовления чувствительных элементов используется сравнительно недорогой чистый никель.

Никелевые тонкопленочные термометры сопротивления имеют ряд преимуществ:

- минимальные размеры, что позволяет обеспечить относительно высокое быстродействие при достаточно высокой точности преобразования;

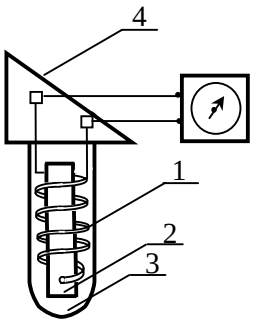
- высокая стабильность температурного коэффициента сопротивления;

- низкая стоимость.

Диапазон измерений при использовании никелевых термометров сопротивления составляет от –40 до 150^{0}С в долговременном режиме, при этом, погрешность измерения не превышает ±0,3%. Высокая долговременная стабильность позволяет использовать такие датчики температуры в системах контроля энергетических установок, учета расхода тепла в системах отопления и горячего теплоснабжения и др.

2.11 Конструктивное выполнение термометров сопротивления

Промышленность выпускает унифицированные конструкции термометров сопротивления для измерения температуры жидких и газообразных сред. Чувствительный элемент металлического термометра состоит из проволоки или ленты, которая намотана на каркас из стекла, кварца, керамики, слюды или пластмассы (рисунок 2.33). Для уменьшения влияния внешних электрических и магнитных полей проволочное сопротивление 1 наматывают на каркас 2 бифилярно (т.е. сдвоенным проводом). При таком способе намотки образуются два соленоида, расположенных один в другом, и направления токов в них всегда противоположны, что делает такую намотку безиндукционной. Пространство между корпусом и проволочной спиралью заполнено порошком окиси алюминия.



1 – проволочное сопротивление;
2 – каркас; 3 – корпус;
4 - соединительная головка;
5 - измерительный прибор.
Рисунок 2.33 – Устройство термометра сопротивления

Платиновые термометры сопротивления изготавливаются из проволоки диаметром 0,03 –0,1 мм, медные – из проволоки диаметром 0,05-0,1 мм. Безиндукционная намотка обеспечивает возможность включения термометра сопротивления в схему измерения с приборами, питаемыми постоянным или переменным током.

Металлические термометры сопротивления используются для измерения температуры воздуха, газообразного и жидкого топлива, кислорода, охлаждающей металлические конструкции агрегата воды, пара, низкотемпературных продуктов сгорания и др.

2.12 Вторичные приборы для термометров сопротивления

В качестве вторичных приборов для измерения температуры с использованием термометров сопротивления применяются: неуравновешенные мосты, уравновешенные мосты, логометры.

Неуравновешенные мосты для измерения температуры применяют редко. Однако, они нашли широкое применение для измерения сопротивления в газоанализаторах, концентратомерах и ряде других средств измерения. Неуравновешенный мост состоит из четырех резисторов, три из которых (R_1, R_2, R_3) выполнены из манганина и их сопротивления в процессе измерения не изменяются, и одного термометра сопротивления (R_t) как чувствительного элемента, расположенного в объекте измерения температуры (рисунок 2.34). Электрическая схема моста представляет собой прямоугольник, на сторонах которого располагаются манганиновые сопротивления R_1, R_2, R_3 и термометр сопротивления R_t. К одной диагонали моста (точки 1 и 2) подводится питание от батареи или другого источника, на другой диагонали (измерительные точки «а» и «б») располагается измерительный прибор.

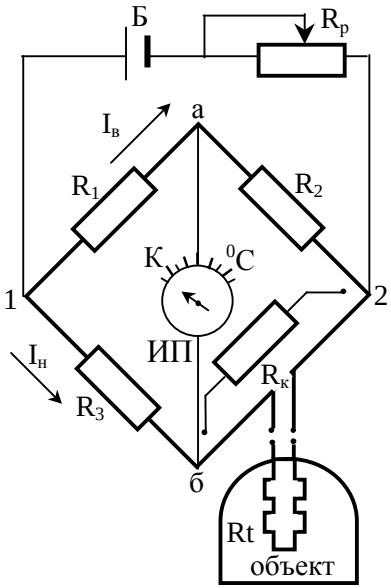


Рисунок 2.34 –Схема неуравновешенного моста

При измерении температуры сначала производится контроль напряжения между точками «а» и «б». Для этого в плечо моста «б-2» включается контрольное сопротивление R_k и при помощи регулировочного сопротивления R_k устанавливается стрелка измерительного прибора ИП на контрольной точке (k), т.е. при этом устанавливается градуировочное значение напряжения в измерительной диагонали. После операции «контроль» включается термометр сопротивления R_t и отключается R_k.

При измерении температуры изменяется сопротивление термометра R_t и в измерительной диагонали между точками «а» - «б» возникнет разность потенциалов,

которую можно определить как разность падений напряжений между соседними плечами моста, т.е.

$$U_{а\text{-}б} = U_{а\text{-}2} - U_{б\text{-}2}, \qquad (2.39)$$

где

$$U_{а\text{-}2} = I_в \cdot R_2; \quad U_{б\text{-}2} = I_н \cdot R_t. \qquad (2.40)$$

Токи, протекающие через два верхних сопротивления и два нижних сопротивления, соответственно определяются :

$$I_в = \frac{U_{1-2}}{R_1 + R_2}; \quad I_н = \frac{U_{1-2}}{R_3 + R_t} \qquad (2.41)$$

Подставив полученные значения токов и напряжений формул (2.40), (2.41) в первоначальную формулу (2.39), получим зависимость падения напряжения в измерительной диагонали от R_t:

$$U_{а-б} = U_{1-2}\left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_t}{R_3 + R_t}\right) \qquad (2.42)$$

Из формулы (2.42) неуравновешенного моста видно, что напряжение в измерительной диагонали, измеряемое измерительным прибором, зависит только от значения R_t, т.е. от температуры в объекте при неизменяемых значениях остальных параметров, входящих в эту формулу. Вследствие этого, для обеспечения правильности показаний прибора необходимо поддерживать постоянное напряжение в точках «1» и «2» при помощи регулировочного сопротивления (реостата) R_p или применять специальный стабилизированный источник питания. В первом случае, при наличии внутреннего источника питания в виде батареи или аккумулятора, прибор является автономным и не зависит от внешнего источника питания. Во втором случае, для работы прибора необходимо наличие постороннего источника питания возле объекта, в котором измеряется температура. Неуравновешенные мосты являются достаточно чувствительными и точными приборами с классом точности меньше 0,5 и могут применяться даже как контрольные для поверок автоматических мостов и термометров сопротивления.

В промышленных условиях для непрерывного измерения температуры воды, пара, различных газовых сред применяются *автоматические уравновешенные мосты* (рисунок 2.35). Уравновешенным мостом называется такая мостовая электрическая схема, в которой разность потенциалов между точками «а» и «б» в момент измерения равна нулю. Для уравновешивания моста необходимо одно из сопротивлений на любом плече моста сделать переменным. Условие равновесия мостовой схемы можно определить из формулы (2.42), где $U_{а\text{-}б}$

необходимо приравнять к нулю:

$$0 = U_{1-2}\left(\frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_t}{R_3+R_t}\right) \qquad (2.43)$$

Из двух сомножителей, стоящих в правой части уравнения, приравнять нулю можно только выражение, стоящее в скобках, поэтому:

$$\frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_t}{R_3+R_t} = 0\,. \qquad (2.44)$$

Откуда:

$$R_t \cdot R_1 = R_2 \cdot R_3. \qquad (2.45)$$

Как видно из этого выражения (2.45), мостовая схема будет находиться в равновесии, если произведения сопротивлений противоположных плеч будут между собой равны. Для обеспечения такого равенства сопротивление R_2 выполнено переменным, при этом, каждому значению R_t будет соответствовать вполне определенное сопротивление R_2 , т.е.

$$R_t = \frac{R_3}{R_1} R_2 = k \cdot R_2\,. \qquad (2.46)$$

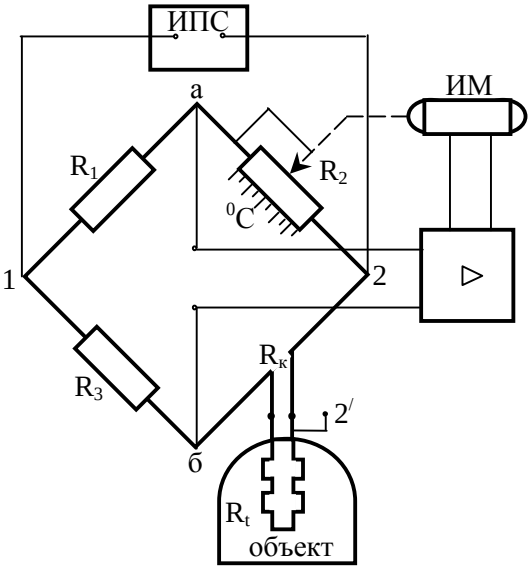


Рисунок 2.35 – Схема уравновешенного автоматического моста

Таким образом, между температурой в объекте (выраженной через R_t) и положением движка сопротивления R_2 имеет место однозначная зависимость, и положение движка укажет значение измеряемой температуры (если вся длина сопротивления R_2 отградуирована в градусах).

Работа автоматического моста происходит следующим образом. При изменении температуры в объекте изменяется величина R_t и между точками «а» и «б» появляется разность потенциалов, которая поступает на электронный усилитель. Усиленный сигнал управля-

ет работой исполнительного механизма ИМ, который будет перемещать движок переменного сопротивления (реохорда) R_2 до тех пор, пока, разность потенциалов между точками «а» и «б» не будет равна нулю, при этом, вся система (включая мост, электронный усилитель, исполнительный механизм) придет в состояние равновесия.

Схема уравновешенного автоматического моста получила наибольшее распространение при измерении температуры с использованием термометра сопротивления, т.к. обладает следующими преимуществами:

- показания моста не зависят от колебания напряжения питания;
- показания прибора линейно связаны с изменением измеряемой температуры;
- измерение температуры осуществляется автоматически;
- конструкция мостов позволяет осуществлять запись показаний температуры объекта.

К числу недостатков схемы следует отнести:

- необходимость в схеме достаточно сложного устройства для уравновешивания (электронный усилитель, исполнительный механизм, реохорд);
- трудность или невозможность измерения малых сопротивлений;
- влияние изменения сопротивления соединительных проводов на показания прибора.

Для уменьшения влияния сопротивления проводов применяют трехпроводную схему включения термометра сопротивления в мостовую схему, т.е. источник питания одним полюсом подключается непосредственно к одному из концов термометра сопротивления (на рисунке 2.35 точку 2 переносят в точку 2′). В этом случае сопротивление линии термометра включают в два соседних плеча моста, что позволяет в значительной степени уменьшить температурную погрешность от изменения сопротивления линии.

В настоящее время промышленность выпускает автоматические уравновешенные мосты различных модификаций с классом точности 0,25 и 0,5: показывающие, самопишущие с ленточной и дисковой диаграммой, с сигнальными и регулирующими устройствами, одноточечные и многоточечные, миниатюрные, малогабаритные и нормальногабаритные, с различной градуировкой для работы с медными и платиновыми термометрами сопротивления, с различными пределами измерения температуры от –200 до +650 °С.

Логометры. Магнитоэлектрический логометр (логос - «отношение») является вторичным прибором, работающим в комплекте с термометрами сопротивления для измерения температуры газообразных и жидких сред. Принцип действия логометра основан на измерении отношения двух токов, проходящих через две жестко скрепленных рамки, находящиеся в магнитном поле постоянного магнита. Логометр (рисунок 2.36) состоит из постоянного магнита с полюсными наконечниками овальной формы и поэтому значение магнитной индукции в разных точках воздушного зазора при разном угле поворота рамок и стрелки будет различным. Воздушный зазор уменьшается от центра к краям полюсных наконечников и соответственно от центра к краям полюсных наконечников возрастает магнитная индукция в зазоре. Обе рамки логометра питаются от одного источника питания Б и включены таким образом, что их вращающие моменты направлены навстречу друг другу. Значения вращающих моментов рамок M_1 и M_2 можно определить по формулам:

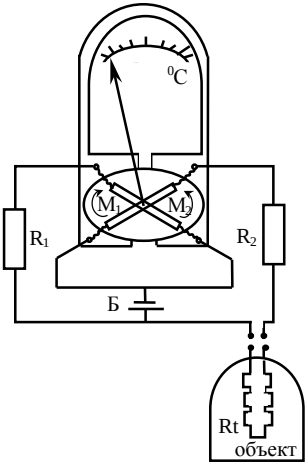


Рисунок 2.36 – Схема логометра

$$M_1 = k \cdot I_1 B_1; \qquad M_2 = k \cdot I_2 B_2, \qquad (2.47)$$

где I_1 и I_2 - значение токов, проходящих через рамки;

B_1 и B_2 – значение магнитной индукции в местах расположения рамок;

k – коэффициент, определяемый геометрическими параметрами рамки и числом витков рамки.

При измерении температуры изменяется значение R_t и изменяется, в свою очередь, значение токов I_1 и I_2, проходящих через рамки. На рамках возникнут различные вращающиеся моменты M_1 и M_2 и система из двух рамок начнет поворачиваться. При этом рамка с большим вращающим моментом попадает в более слабое магнитное поле и ее момент будет уменьшаться, в то время как рамка с меньшим вращающим моментом попадает в сильное магнитное поле и ее момент будет увеличиваться. При определенном угле поворота вращающие моменты сравняются и рамки остановятся, т.е.

$$M_1 = M_2.$$

или

$$I_1 \cdot B_1 = I_2 \cdot B_2 \qquad (2.48)$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{B_2}{B_1} \qquad (2.49)$$

Учитывая, что отношение $\frac{B_2}{B_1}$ является функцией угла α поворота двух рамок, можно записать

$$\frac{B_2}{B_1} = f(\alpha) .$$

Отношение же токов $\frac{I_1}{I_2}$ зависит от величины R_t, т.е. от значения температуры в объекте, что можно представить как :

$$\frac{I_1}{I_2} = \varphi(R_t).$$

Таким образом, угол поворота подвижной системы (двух рамок и показывающей стрелки), при котором моменты M_1 и M_2 будут равны, (положение равновесия системы), зависит от сопротивления термометра, а, значит, от измеряемой температуры и не зависит от напряжения питания.

В логометрах подвод тока к рамкам осуществляется с помощью маломоментных спиральных волосков, которые одновременно служат и для возвращения стрелки в исходное положение при выключенном источнике питания. В этом случае изменение напряжения питания на ±10% от номинального значения вызывает изменение показаний, обычно не превышающее предела допускаемой основной погрешности логометра.

Основным недостатком логометров, работающих с высокоомными термометрами сопротивления, является влияние сопротивление подводящих проводников, значение которых может меняться при изменении окружающей температуры. Для уменьшения температурной погрешности прибора последовательно с рамками включают манганиновые резисторы. Однако, такая операция приводит к некоторой потере чувствительности логометра, что ограничивает верхний предел величины сопротивления дополнительных резисторов. Кроме того, на точность измерения температуры влияют моменты трения в опорах, моменты сопротивления токоподводов, момент инерции подвижной

системы и ряд других факторов (например, наличие внешних магнитных полей).

В эксплуатации на промышленных объектах находятся логометры различных модификаций: переносные, щитового монтажа, со специальными устройствами для регулирования и сигнализации, показывающие и самопишущие (до 12 точек), с классом точности 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0.

2.13 Измерение температуры методом оптической пирометрии

Оптическая пирометрия основана на законах теплового (электромагнитного) излучения тел и по сравнению с другими методами измерения температуры имеет ряд преимуществ:

- теплоприемник (чувствительный элемент) не находится в объекте, температура в котором измеряется. Такой метод называется бесконтактным, т.е. чувствительный элемент непосредственно не контактирует с объектом (водой, паром, газом, твердым телом и др.), не вносит искажения в температурное поле объекта и не подвергается вредному воздействию со стороны объекта;
- практически неограниченный диапазон измеряемых температур от самых низких до сверхвысоких. Сверхвысокие температуры (выше 3000 °С) можно измерить только методами оптической пирометрии;
- быстрое получение информации о тепловом состоянии объекта благодаря малой тепловой инерции чувствительных элементов, используемых в оптической пирометрии.

Оптической пирометрии присущи также и недостатки:

- влияние поглощающей газовой и пылевой среды, находящейся между объектом и чувствительным элементом, на точность измерения;
- влияние радиационных свойств (монохроматической и спектральной степени черноты, селективности поглощения и излучения электромагнитных волн и др.)
- нелинейная характеристика чувствительных элементов обусловленная нелинейными законами теплового излучения тел.

В основу бесконтактных методов измерения температур был положен фундаментальный закон излучения нагретых тел ($T>0$ К), открытый немецким физиком Максом Планком в 1901 г., в котором устанавливается зависимость энергетической светимости абсолютно

черного тела от его температуры на различных длинах волн. Эта зависимость описывается уравнением Планка:

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5\left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1\right)}, \ \frac{Вт}{м^3} \qquad (2.50)$$

где $C_1 = 2\pi \cdot h \cdot c^2$, $C_2 = \frac{hc}{k}$ – постоянные коэффициенты;

$h = 6{,}63\ 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка;

$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана;

$c = 10^8$ м/с – скорость распространения электромагнитных волн;

e – основание натуральных логарифмов;

λ – длина волны излучения, м.

На рисунке 2.37 представлена зависимость спектральной плотности излучения абсолютного черного тела от длины волны при различных температурах. Кривые на рисунке показывают, что спектральная яркость с увеличением температуры черного тела быстро возрастает. Например, в видимой области спектра от 0,4 до 0,7 мкм спектральная яркость черного тела при изменении температуры от 1000 К до 2000 К возрастает соответственно в 20 и 16 раз быстрее, чем температура.

Такое резкое изменение яркости тела при сравнительно небольшом изменении температуры в видимой области спектра позволяет осуществлять измерение температуры в этом диапазоне длин волн по изменению яркости тела.

Приборы, предназначенные для измерения яркостной температуры в видимой области спектра, обычно называют *оптическими пирометрами*. Большое распространение получили приборы, которые и в настоящее время находятся в эксплуатации, называемые оптическими пирометрами с исчезающей нитью. Интервал измеряемых температур для промышленных и лабораторных пирометров с исчезающей нитью составляет от 700 до 8000 °С в видимой области спектра.

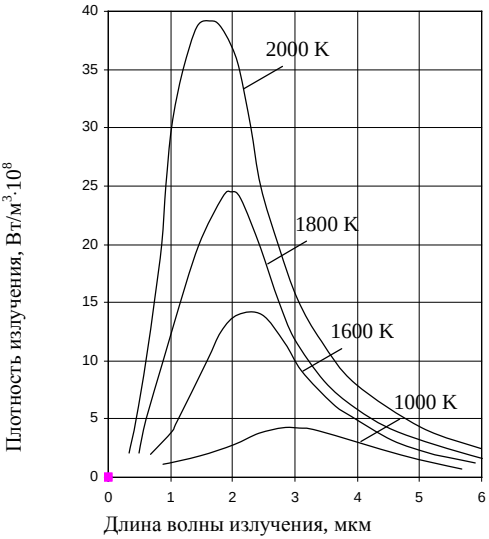


Рисунок 2.37 – Зависимость плотности излучения черного тела от длины волны и абсолютной температуры

Измерение температуры оптическими пирометрами основано на сравнении яркости тела, температура которого измеряется, с яркостью нити эталонной лампы, которая отградуирована по излучению абсолютно черного тела согласно закону Планка (формула 2.50). Сравнение двух яркостей производится человеческим глазом через красный светофильтр с длиной волны λ = 0,65 мкм, что позволяет световой поток рассматривать как эквивалентное монохроматическое излучение с погрешностью не превышающей 0,1 мкм. Выбор красного светофильтра обусловлен наибольшей чувствительностью глаза в этом диапазоне длины волны излучения, что значительно повышает точность сравнения яркостей измеряемого тела (объекта) и эталонной лампы.

На рисунке 2.38 представлена схема оптического пирометра, который состоит из корпуса с объективом 1 и окуляром 5, двух светофильтров 2 и 4, пирометрической (эталонной) лампы 3, источника питания 6, реостата 7, измерительного прибора 8.

Излучение объекта, температура которого измеряется, проходит через объектив 1, далее через красный светофильтр 4 и окуляр 5 попадает на глаз оператора. Одновременно оператор воспринимает излучение и от пирометрической лампы. Перемещая движок реостата 7, оператор изменяет величину тока, проходящего через лампу, и добивается уравновешивания яркости нити и яркости объекта.

Если яркость нити меньше яркости тела, то она на его фоне выглядит черной полоской, при большей температуре нити она будет выглядеть как светлая полоска на более темном фоне. При равенстве яркостей объекта и нити, последняя «исчезает» из поля зрения опера-

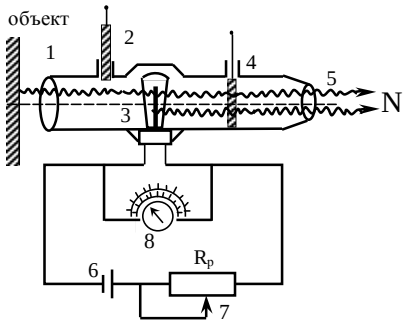


Рисунок 2.38 – Схема оптического пирометра

тора. Этот момент свидетельствует о равенстве яркостных температур объекта измерения и нити пирометрической лампы. В общепромышленных оптических пирометрах в качестве измерительного прибора используется показывающий милливольтметр с несколькими шкалами (двумя или тремя) для измерения сравнительно низких (700 – 1400 °С), средних (1200 – 2000 °С) и высоких (более 2000 °С) температур. При измерении средних и высоких температур для предохранения вольфрамовой нити от перегрева и сохранения стабильной градуировки пирометра применяются нейтральные светофильтры, которые вводятся между объективом и лампой. На рисунке 2.38 показана схема пирометра с двумя шкалами для низких и средних температур. При переходе на вторую шкалу (средних температур) используется нейтральный светофильтр 2. При вводе нейтрального светофильтра яркость объекта для оператора, который производит измерение температуры, уменьшается в десятки раз и поэтому требуется меньшая яркость (меньшая температура) вольфрамовой нити пирометрической лампы при сравнении ее с яркостью объекта, температура которого измеряется.

В оптических пирометрах повышенной точности и образцовых в качестве измерительных приборов используются потенциометры, обеспечивающие большую точность измерения.

Оптические пирометры градуируются по излучению абсолютно чёрного тела, поэтому они измеряют не действительную температуру объекта, а так называемую яркостную.

Яркостной температурой реального тела на определённой длине волны называется такая температура абсолютно чёрного тела, при которой спектральная энергетическая яркость этого тела равна спектральной энергетической яркости реального тела при его действительной температуре (рисунок 2.39). Таким образом, оптические пи-

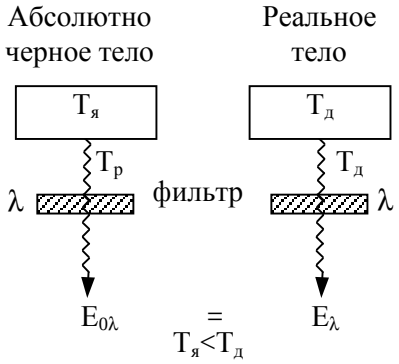


Рисунок 2.39 – Схема, поясняющая понятие яркостной температуры

рометры дают заниженные показания температуры реального тела и поэтому необходимо вводить поправку. Поправка вводится на основании определения яркостной температуры по формуле Планка.

При температуре тела T<3000K, что имеет место в реальной практике температурных измерений, формула Планка (2.50) переходит в формулу Вина, так как комплекс $e^{\frac{c_2}{\lambda \cdot T}} >> 1$. Поэтому можно записать:

- для абсолютно чёрного тела

$$E_{o\lambda} = \frac{c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_я}}}; \qquad (2.51)$$

- для реального тела

$$E_\lambda = \frac{\varepsilon_\lambda c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_д}}}, \qquad (2.52)$$

где ε_λ – монохроматическая степень черноты реального тела.

Учитывая равенство спектральных энергетических яркостей реального и чёрного тела согласно определению яркостной температуры и рисунка 2.39, приравняв правые части уравнений (2.51) и (2.52), получим действительное значение температуры реального тела:

$$\frac{c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_я}}} = \frac{\varepsilon_\lambda c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda T_д}}}, \qquad (2.53)$$

или

$$T_д = \frac{1}{\frac{1}{T_я} - \frac{\ln 1/\varepsilon_\lambda}{c_2/\lambda}}. \qquad (2.54)$$

При известном значении константы c_2 и принятой длине волны пропускания светофильтров равной λ=0,65 мкм для оптических пирометров, можно записать формулу, по которой вводится поправка для определения действительной температуры реального тела при использовании оптических пирометров.

$$T_{ист}=\frac{1}{\frac{1}{T_я}-\frac{\ln\frac{1}{\varepsilon_\lambda}}{9568}} \qquad (2.55)$$

Следует отметить, что для определения действительной температуры объекта $T_{ист}$ по яркостной температуре $T_я$ необходимо знать спектральную степень черноты ε_λ, которая для каждого материала имеет своё значение и определяется по справочным данным. В таблице 2.5 даны значения ε_λ некоторых тел на длине волны λ = 0,65 мкм.

Таблица 2.5 – Монохроматический коэффициент теплового излучения (монохроматическая степень черноты) некоторых тел при λ= 0,65 мкм.

Материал	Монохроматический коэффициент теплового излучения поверхности тела	
	неокисленной	окисленной
Сталь углеродистая твёрдая	0,45	0,80
Сталь углеродистая жидкая	0,37	-
Железо твёрдое	0,32-0,43	0,50-0,95
Железо жидкое	0,41-0,50	0,55-0,95
Медь твёрдая	0,11-0,20	0,20-0,35
Медь жидкая	0,12-0,19	-
Вольфрам	0,43	-
Графит	0,80-0,96	-
Шлаки жидкие	0,75-0,95	-
Огнеупоры	0,80-0,95	-

При измерении яркостной температуры с помощью оптического пирометра необходимо учитывать, что величина ε_λ зависит не только от температуры тела и длины волны, но и от характера поверхности данного тела. Увеличение шероховатости поверхности реального тела

приводит к возрастанию ε_λ. Различная степень окисления поверхности металла приводит к изменению коэффициента излучения. Вследствие этого переход от яркостной температуры реального тела к его действительной температуре связан с возникновением методической погрешности от неточности подбора числового значения коэффициента ε_λ. Отклонение от действительного значения ε_λ может достигать $\pm(10\ldots20)\%$, при этом, погрешность измерения температуры ΔT, рассчитанная по формуле Планка (2.50), составит:

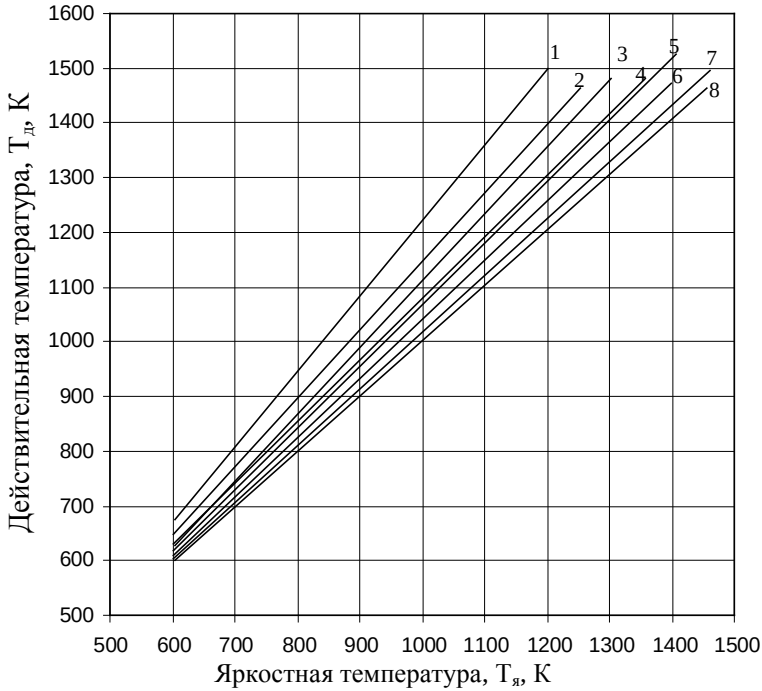
T, K	1100	2000	3000
ΔT, K	±7,2	±27,1	±61

Для повышения надёжности определения действительной температуры тела целесообразно одновременно с измерением яркостной температуры производить и определение коэффициента излучения ε_λ данного тела. В настоящее время созданы оптические пирометры на базе микропроцессорной техники, в которых производится автоматическое определение монохроматического коэффициента излучения тела, температура которого измеряется. Данные по $T_я$ и ε_λ поступают на вычислительный блок микропроцессора, который, решая уравнение Планка, определяет значение температуры тела.

При известном значении коэффициента излучения ε_λ можно использовать номограмму (рисунок 2.40) для определения действительной температуры по известной яркостной температуре $T_я$, определяемой оптическим пирометром.

Фотоэлектрические пирометры.

В фотоэлектрических пирометрах в отличии от оптических пирометров визуальный метод измерения температуры заменяется на автоматический. В качестве чувствительных элемента используются фотодиоды, фотосопротивления, фотоэлементы, фотоумножители др. При попадании светового (теплового) потока на чувствительный элемент изменяются его электрические характеристики (сопротивление, ток), пропорциональные интенсивности светового потока, испускаемого нагретым телом. Наибольшее распространение в качестве чувствительных элементов получили сурьямо-цезиевые и кислородно-цезиевые фотоэлементы с диапазоном измерения от 800 до 4000 °С и чувствительные к излучению только в видимой области спектра. Рабочий спектральный интервал, используемый в этих пирометрах, составляет от 0,6 до 0,72 мкм, что совпадает с областью пропускания для оптических пирометров (0,63 мкм). Благодаря этому при измере-



1 - ε=0,2; 2 - ε=0,3; 3 - ε=0,4; 4 - ε=0,5;
5 - ε=0,6; 6 - ε=0,7; 7 - ε=0,8; 8 - ε=0,9;

Рисунок 2.40 – Номограмма для определения действительной температуры.

нии температуры вводится поправка по такой же методике, что и для оптических пирометров.

На рисунке 2.41 представлена схема фотоэлектрического пирометра, который состоит из трёх основных элементов: визирной головки 2, электронного блока 8, измерительного прибора 9.

Тепловое излучение как от объекта, температура которого измеряется, так и эталонной лампы 3, проходя через оптическую систему и красный светофильтр 5, поочерёдно попадает на фотоэлемент 6 благодаря выбрирующей заслонке 4, которая совершает колебательные движения и прерывает световые потоки.

При попадании теплового излучения на катод фотоэлемента, выполненного в виде изогнутой пластинки и покрытого металлом с малой работой выхода электронов (цезий, калий, натрий и др.), из него выбиваются электроны, которые движутся к аноду, имеющему положительный потенциал.

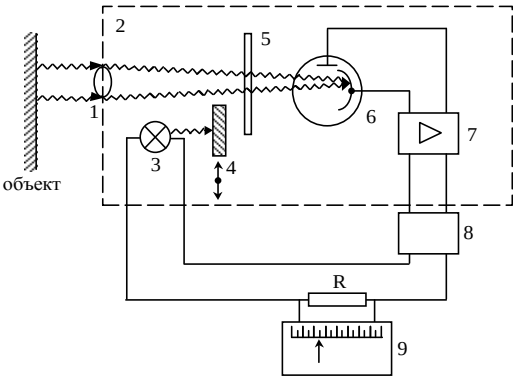


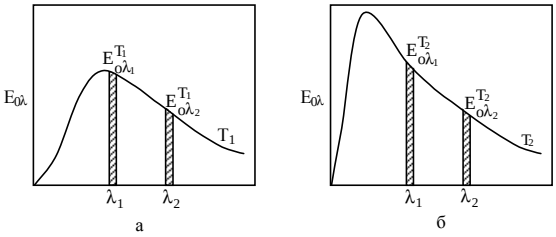
Рисунок 2.41 – Схема устройства фотоэлектрического пирометра

Таким образом, в цепи фотоэлемента возникает электрический ток, величина которого зависит от интенсивного теплового (электромагнитного) излучения или от объекта, или от эталонной лампы, т.е. зависит от температуры излучателей. В усилителе 7 и электронном блоке 8 происходит сравнение этих токов, и если они не равны, то на выходе электронного блока 8 появится ток, который будет питать эталонную лампу. При этом, яркость нити накаливания эталонной лампы будет увеличиваться до тех пор, пока интенсивности (яркости) излучения от объекта и лампы не сравняются. Таким образом, с достаточной точностью можно считать, что сила тока в цепи эталонной лампы однозначно связана с яркостной температурой объекта. В цепь лампы включён постоянный калиброванный резистор R, напряжение на котором измеряется быстродействующим автоматическим потенциометром 9, который покажет яркостную температуру объекта.

Пределы допускаемой основной погрешности показаний фотоэлектрических пирометров с диапазоном измерения от 800 до 2000 °С не превышают ±1% верхнего предела измерения, а при температурах выше 2000^0С – не более 1,5%. Время установления показаний пирометра около 1 с.

2.14 Пирометры спектрального отношения

Пирометры спектрального отношения или цветовые пирометры основаны на зависимости от температуры тела отношения спектральных энергетических яркостей на двух участках спектра, каждый из которых характеризуется эффективной длиной волны λ_1 и λ_2. На рисунке 2.42 показано изменение энергетической яркости на двух участках λ_1 и λ_2 кривой Планка при различной температуре T_1 и T_2. Как видно из рисунка, при увеличении температуры тела изменяется отношение энергетических яркостей на этих участках длин волн.



а – при температуре T_1;
б – при температуре T_2 ($T_2 > T_1$)
Рисунок 2.42 – Изменение спектральных энергетических яркостей на двух диапазонах длин волн

Так, например, при T_1 отношение $\frac{E^{T_1}_{o\lambda_1}}{E^{T_1}_{o\lambda_2}} \approx 1{,}50$, а при T_2 это отношение $\frac{E^{T_1}_{o\lambda_1}}{E^{T_1}_{o\lambda_2}} \approx 1{,}92$ при условии, что $T_2 > T_1$.

Конструктивно пирометры спектрального отношения выполняются двухканальными и одноканальными. В схеме двухканального пирометра используются два фотоэлемента, измеряющих энергетические яркости объекта каждый в своём диапазоне длин волн λ_1 и λ_2. В одноканальном пирометре обе яркости воздействуют на один и тот же приёмник поочерёдно. На рисунке 2.43 приведена схема двухканального пирометра спектрального отношения, в котором излучение от нагретого тела после объектива 1 раздваивается при помощи призмы 2 и направляется через светофильтры красный λ_1 и синий λ_2 на два фотоэлемента Ф1 и Ф2. Сигналы фотоэлемента усиленные электронными усилителями ЭУ1 и ЭУ2, подаются на блок сравнения этих сигналов БС, который вырабатывает результирующий сигнал, пропорциональный отношению спектральных энергетических яркостей тела на двух длинах волн λ_1 и λ_2. Для измерения результирующего сигнала (в виде электрического потенциала) используется автоматический потенциометр 3.

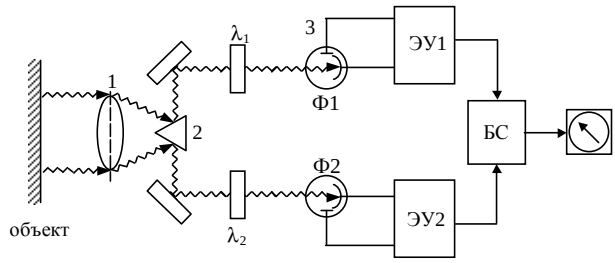


Рисунок 2.43 – Схема двухканального пирометра спектрального отношения

Пирометры спектрального отношения градуируются по излучению абсолютно чёрного тела, потому они определяют не истинную температуру, а так называемую цветовую. *Цветовой температурой* называет-

ся такая температура абсолютно чёрного тела, при которой отношение спектральных энергетических яркостей абсолютно чёрного тела на двух длинах волн равно отношению спектральных энергетических яркостей реального тела на этих же длинах волн при его действительной температуре (рисунок 2.44). Поправка для определения действительной температуры вводится на основании определения цветовой температуры с использованием формулы Вина (2.51).

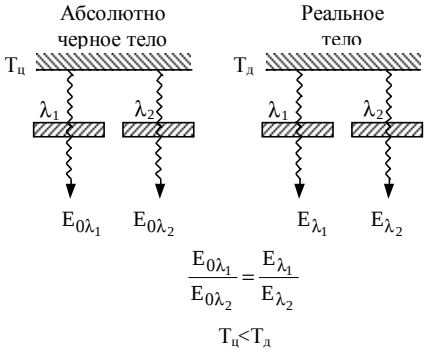


Рисунок 2.44 – Схема, поясняющая понятие цветовой температуры

Согласно схеме, показанной на рисунке 2.44, можно записать:

$$\frac{E_{o\lambda_1}}{E_{o\lambda_2}} = \frac{E_{\lambda_1}}{E_{\lambda_2}}, \qquad (2.56)$$

где

$$E_{o\lambda_1} = \frac{c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda_1 T_ц}}};\ E_{o\lambda 2} = \frac{c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda_2 T_ц}}};$$

$$E_{\lambda_1} = \frac{\varepsilon_{\lambda_1} c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda_1 T_д}}};\ E_{\lambda 2} = \frac{\varepsilon_{\lambda_{21}} c_1}{e^{\frac{c_2}{\lambda_2 T_д}}}.$$

Подставив эти уравнения Вина в первоначальное (2.56) и произведя соответствующие преобразования, получим формулу для определения действительной температуры реального тела:

$$T_д = \frac{1}{\frac{1}{T_ц} - \frac{\ln\frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}}}{\frac{c_2}{\lambda_2} - \frac{c_2}{\lambda_1}}} \qquad (2.57)$$

Для определения действительной температуры тела по полученной формуле необходимо знать спектральные характеристики (степени черноты) тела на двух длинах волн λ_1 и λ_2 (длины волн известны по применяемым светофильтрам), что затрудняет получение действительной информации о температуре тел, спектральные характеристики которых изучены недостаточно. Однако, для многих тел (большинство огнеупорных изделий, окисленные металлы и др.) ε_{λ_1} и ε_{λ_2} отличаются незначительно и поэтому с достаточной степенью точности можно принять измеренную температуру как действительное значение тем-

пературы тела, при этом погрешность не превышает 1%. При введении поправки по формуле 2.57 следует иметь ввиду, что для тел, у которых монохроматическая степень черноты убывает с ростом длины волны ($\varepsilon_{\lambda_1} < \varepsilon_{\lambda_2}$), цветовая температура больше действительной температуры. Для тел, у которых монохроматическая степень черноты возрастает по мере роста длины волны ($\varepsilon_{\lambda_1} > \varepsilon_{\lambda_2}$), цветовая температура меньше действительной температуры.

В настоящее время разработан ряд пирометров (в частности пирометров спектрального отношения), в которых осуществляется автоматическое введение поправок, вычисляемых на основе законов излучения нагретых тел. На рисунке 2.45 показана схема пирометра спектрального отношения, измеряющего действительную температуру тела. Тепловое излучение от объекта попадает попеременно на фотоэлемент 2 через два светофильтра λ_1 и λ_2, установленных на вращающемся обтюраторе 1.

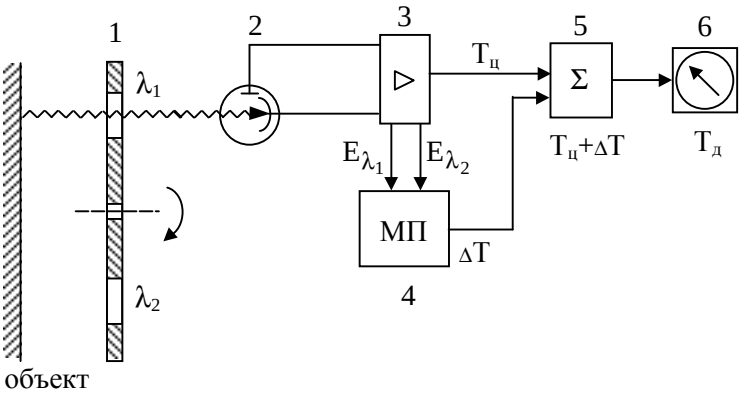


Рисунок 2.45 – Схема одноканального пирометра спектрального отношения с автоматической коррекцией температуры

Сигналы фотоэлемента, пропорциональные спектральным яркостям объекта на двух длинах волн, подаются на электронный блок 3, в котором производится усиление этих сигналов и выдача их на микропроцессор 4. С другой стороны, в электронном блоке 3 сравниваются два сигнала от фотоэлемента и выдаётся результирующий сигнал, пропорциональный цветовой температуре $T_ц$.

Микропроцессор, получая информацию E_{λ_1} и E_{λ_2} и имея данные в программированном устройстве о величине длин волн λ_1 и λ_2, рас-

считывает величину поправки ΔT в виде электрического сигнала. Два сигнала $T_ц$ и ΔT обрабатываются в суммирующем блоке 5, который выдаёт сигнал, пропорциональный действительному значению температуры $T_д$, на регистрирующий измерительный прибор 6.

Пирометр рассчитан на диапазон измерения действительных температур от 800 до 2000 °С. Суммарная погрешность измерения действительных температур при изменении коэффициента лучеиспускательной способности (степени черноты ε), объекта от 0,3 до 1 не превышает ±1% нормирующего значения.

2.15 Пирометры полного излучения

Действие пирометров полного излучения основано на законе Стефана-Больцмана, который связывает полную энергию излучения нагретого тела и его температуру по формуле

$$E=\varepsilon\cdot\sigma\cdot T^4, \qquad (2.57)$$

где ε - интегральный коэффициент излучения (интегральная степень черноты) реального тела;

σ- постоянная Стефана-Больцмана, $\sigma=5{,}67\cdot10^{-8}$ Вт/м$^2\cdot$К^4.

Приборы, измеряющие полную энергию излучения, получили название радиационные пирометры. Датчик пирометра (первичный преобразователь) выполняется в виде телескопа (рисунок 2.46), линза объектива 1 которого фокусирует тепловое излучение от нагретого тела практически в диапазоне длин волн от 0,4 до 4 мкм на теплоприёмнике.

В качестве чувствительного элемента в большинстве случаев применяют термобатарею 2 из нескольких последовательно соединённых термопар (например, хромель-копелевых). Поток излучения попадает на расклёпанные в виде тонких зачернённых лепестков рабочие концы термопар (рисунок 2.47), количество которых составляет от 6 до 10 штук. Свободные концы термопар привариваются к тонким пластинкам, закреплённых на слюдяном кольце и располагаются в непосредственной близости от корпуса теле-

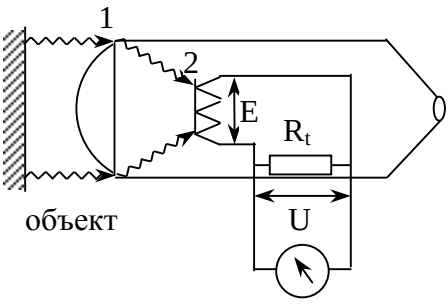


Рисунок 2.46 – Схема устройства пирометра полного излучения

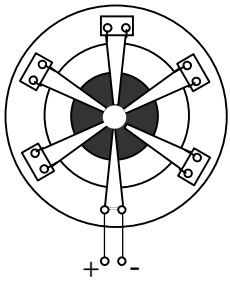


Рисунок 2.47 – Термобатарея пирометра

скопа для относительной стабилизации их температуры. Металлические выводы (+,–) служат для подсоединения измерительного прибора, в качестве которого обычно используются потенциометры или милливольтметры.

В процессе измерения температуры тепловой поток проникает внутрь корпуса телескопа, разогревает стенки корпуса прибора, при этом повышается температура свободных концов термопар. Возникающая при этом погрешность будет тем больше, чем выше температура корпуса прибора.

Для снижения этого вида погрешности радиационные пирометры снабжаются различными устройствами температурной компенсации. Наиболее распространенный способ температурной компенсации осуществляется с помощью электрического шунта R_t, изготовленного из меди или никеля. Резистор R_t, шунтирующий термобатарею с сопротивлением r, помещают в корпусе телескопа рядом со свободными концами батареи термопар. При измерении температуры вторичный прибор (милливольтметр или потенциометр) определяет не ЭДС батареи термопар, а падение напряжения U на шунтирующем резисторе, которое равно:

$$U=I\cdot R_t.$$

Ток I, протекающий в цепи термопары обусловлен развиваемой термобатареей ЭДС и определяется по формуле:

$$I=\frac{E}{r+R_t}.$$

Подставив значение тока в первоначальное уравнение, получим:

$$U=\frac{E\cdot R_t}{r+R_t} \text{ или } U=\frac{E}{\frac{r}{R_t}+1}.$$

Как видно из последнего выражения, при нагреве корпуса прибора уменьшается величина E из-за увеличения температуры свободных концов термобатареи. С другой стороны, увеличивается значение сопротивления R_t и поэтому величина U практически не изменяется при правильно выбранном начальном значении R_t.

В промышленных условиях телескоп пирометра находится на от-

носительно близком расстоянии от объекта, температура которого измеряется, что может привести к значительному перегреву корпуса прибора. Для предохранения корпуса телескопа от перегрева его помещают в специальный защитный кожух, охлаждаемый проточной водой.

Радиационные пирометры градуируются по тепловому излучению абсолютно черного тела, поэтому они измеряют не действительную температуру, а так называемую «радиационную».

Радиационной температурой называется такая температура абсолютно черного тела, при которой его полная энергия излучения равна полной энергии излучения реального тела при его действительной температуре.

Согласно этому определению и рисунку 2.48, поясняющему смысл радиационной температуры, можно записать

$$E_0 = E.$$

Учитывая формулу Стефана – Больцмана, получим уравнение, из которого можно определить действительное значение температуры реального тела:

$$\sigma \cdot T_{р}^{4} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T_{д}^{4}. \qquad (2.51)$$

Откуда

$$T_д = T_р \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}}. \qquad (2.59)$$

Эта формула позволяет перейти к действительной температуре тела $T_д$, зная интегральный коэффициент излучения (степень черноты) и радиационную температуру $T_р$, измеренную пирометром. Так как для всех реальных тел $0<\varepsilon<1$, то, как видно из формулы (2.59), радиационная температура тела всегда будет меньше его действительной температуры. Величина ε для конкретного тела, температура которого измеряется, приводится в специальной справочной таблице, где даны значения ε для различных тел (приложение Б).

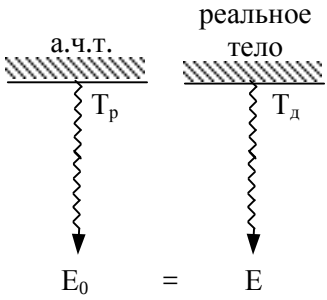


Рисунок 2.48 – Схема для пояснения смысла радиационной температуры

Большинство применяемых в настоящее время радиационных пирометров имеет

рефракторную (в проходящем свете) оптическую систему, т.е. используется собирающая линза для фокусировки теплового потока от объекта на чувствительном элементе (батарея термопар, фотодиод и др.) прибора. При небольших мощностях лучистой энергии и, следовательно, невысоких температурах тел для концентрации энергии применяют рефлекторную оптическую систему (вогнутое зеркало), которое в меньшей степени поглощает и рассеивает приходящую от тела тепловую энергию.

Радиационные пирометры позволяют измерять температуру от 400 до 3500 °С. В качестве вторичных показывающих самопишущих и регулирующих приборов, работающих в комплекте с радиационными пирометрами, используются миливольтметры и автоматические потенциометры, имеющие соответствующую градуировку.

Предел допустимой основной погрешности радиационных пирометров в области температур от 500 до 2500 °С находится в интервале 7,5…30°С.

2.16 Перспективные направления в разработке приборов для измерения температуры

В настоящее время на рынке контрольно–измерительного оборудования появился широкий выбор усовершенствованных приборов для измерения температуры. Главная тенденция - это внедрение современной элементной базы в переносные (ручные) и стационарные (щитовые) измерительные приборы.

Первое существенное новшество, появившееся в ручных приборах – это встроенная память для сохранения результатов измерений. Приборы, имеющие такую память имеют в своем названии определение – Data Logger. Английская фирма TES разработала серию приборов для измерения температуры в диапазоне от 200 до 1333 °С, которые работают с четырьмя типами термопар: k – хромель-алюмелевая; j – железо-медноникелевая; E – никельхром-медноникелевая; T – медь-константановая. Индикация выполняется на цифровом дисплее с двумя рядами служебных символов, которые отображают выбранный канал, тип используемой термопары, состояние батареи. Отображение ведется в градусах Цельсия или Фаренгейта с точностью ±(0,1%…0,8°С) и с максимальной скоростью измерения – один отсчет в секунду. Наличие двух каналов позволяет измерять температуру сразу в двух точках, а также определять разность температур между двумя точками объекта. Прибор может формировать управляющий

сигнал при выходе измеряемых величин за пределы минимума или максимума, установленных заранее.

Главная особенность прибора – встроенная память на 4000 записей результатов измерения. Для идентификации результатов прибор имеет собственные часы (с точностью до секунд) и календарь реального времени. Кроме того, имеется интервальный таймер, показывающий время с начала процедуры измерений. Частота измерений может увеличиваться от одной секунды и более, что создает возможность использования данного прибора в качестве основы для построения мониторинговой системы. Например, при измерении температуры с интервалом в 10 минут прибор сохранит в своей памяти данные за 27 суток. Причем, все данные могут быть переписаны в компьютер в любое время, для чего он оснащен интерфейсом RS –232. Принятые данные, кроме непосредственного отображения, могут заноситься в таблицу (с указанием даты и времени измерения), на основании которой строится временной график.

Вторая особенность прибора – это встроенные минипринтеры. В качестве рабочего принтера применен миниатюрный термопринтер с шириной бумаги 35 мм. Прибор выводит измеренные данные только в табличной форме. Оператор устанавливает периодичность вывода информации, в которой указывается время, дата, номер канала, тип термопары и результат измерения.

В универсальном приборе из этой группы (TES – 30) обеспечивается запоминание и вывод на минипринтер измеряемых данных в виде таблицы или временного графика. Масштаб графика по временной оси (ось «x») или по амплитуде (ось «y») может задаваться вручную. Кроме того, для прибора разработана и поставляется программное обеспечение для передачи данных в компьютер и последующей обработки данных стандартными средствами Windows.

Приведенные функциональные возможности ручных компактных регистраторов температуры позволяют успешно использовать их как в автономном режиме, при проведении наладочных работ и периодическом контроле теплового состояния объекта в полевых условиях, так и в стационарном состоянии вместо щитовых самописцев.

Совершенствованию подверглись также и бесконтактные методы измерения температуры, так как в практике измерений необходимо знать тепловое состояние отдельных частей или точек объекта, где использование обычных контактных термометров невозможно или небезопасно.

Рассмотрим возможности таких приборов на примере инфракрасного пирометра ТМ-908, выпускаемого фирмой «Lutrou». Прибор предназначен для бесконтактного дистанционного измерения температуры в диапазоне от –10 °С до 300°С и состоит из основного блока и измерительного зонда.

Принцип действия пирометра основан на регистрации интенсивности инфракрасного излучения испускаемого поверхностью объекта измерения. В качестве чувствительного элемента используется батарея термопар (несколько десятков термопар, соединенных последовательно), которая фиксирует излучение с длиной волны от 6 до 12 мкм. Именно в этом диапазоне находится максимум энергетической светимости абсолютно черного тела (АЧТ) для температур от –10 °С до 300°С, благодаря чему обеспечивается максимальная чувствительность прибора.

Основные технические характеристики пирометра ТМ-908 приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Технические характеристики пирометра ТМ-908

Параметр	Величина
Диапазон измерения температуры/разрешение	-10…+300°С/1°С -10…+110°С/0,1°С
Погрешность	±2%
Степень черноты измеряемого объекта	регулируемая от 0,1 до 0,95
Датчик	батарея термопар
Инерционность	около 1 с
Расстояние до объекта	от 50 до 1000 мм
Масса пирометра	370 г

Измеренная температура отображается на трехрядном дисплее, при этом, микропроцессор позволяет не только производить измерения, но и фиксирует в памяти максимальное и минимальное значение температуры, а также удерживает на дисплее текущее показание. Прибор автоматически вводит поправку на степень черноты объекта, однако, оператор должен установить на панели прибора заранее известное значение степени черноты, взятое по справочным данным для измеряемого объекта. К числу достоинств пирометра можно также отнести возможность его подключения к персональному компьютеру через последовательный интерфейс RS-232, в результате чего прибор

можно использовать в качестве регистратора данных в стационарных автоматизированных измерительных системах.

Фирма Raytek разработала семейство пирометров для бесконтактного измерения температуры, в которых чувствительный элемент и измерительное устройство (микропроцессор) располагаются в одном блоке. Точное направление прибора на объект или отдельный его элемент осуществляется с помощью лазерного прицела.

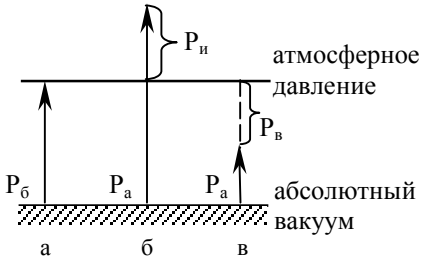
Фирма LAND INFRARED разработала ряд приборов – тепловизоров для дистанционного термообследования крупных промышленных объектов в диапазоне температур от –20 до 1500 °С. Система позволяет одновременно с отображением инфракрасной картинки вывести градуировочную цветовую шкалу, что дает возможность видеть и анализировать тепловое состояние всего объекта.

3 ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ЖИДКИХ И ГАЗОВЫХ СРЕД

3.1 Общие сведения

Во многих отраслях промышленности, а также в научных исследованиях необходимо измерять давление, производимое газовыми и жидкими средами на ограждающие их поверхности (резервуары, трубы, каналы, дымоотводящие тракты, рабочее пространство котлов, печей и др.). Большой диапазон измеряемых давлений, разнообразие свойств жидкостей и газов, разное требование к точности измерений, а также конструктивные особенности объектов предопределяет применение различных методов и средств измерения давления.

При измерениях различают абсолютное $P_а$, избыточное $P_и$, вакуумметрическое $P_в$ и барометрическое $P_б$ давления (рисунок 3.1).



а – барометрическое (атмосферное) давление
б – абсолютное давление, $P_а > P_б$
в – абсолютное давление, $P_а < P_б$
Рисунок 3.1- Соотношение давлений

Под абсолютным давлением понимают полное давление, под которым находится жидкость или газ (пар) при отсчете от абсолютного вакуума.

Абсолютное давление может быть больше (б) или меньше (в) атмосферного. На практике чаще измеряется и используется избыточное давление $P_и$, которое равно:

$$P_и = P_а - P_б,$$

если абсолютное давление больше атмосферного, и вакуумметрическое давление

$$P_в = P_б - P_а,$$

если абсолютное давление меньше атмосферного. При малых отклонениях $P_и$ и $P_в$ от атмосферного давления они обозначаются знаком

"+" или "–".

Приборы для измерения давления, разрежения или разности давлений называются манометрами. Они подразделяются на:

– барометры, измеряющие атмосферное давление;
– манометры избыточного давления или просто манометры;
– напоромеры, измеряющие небольшие избыточные давления, примерно от 0 до + 40 кПа;
– тягомеры, измеряющие разрежения, примерно от 0 до –40кПа;
– тягонапоромеры, измеряющие как положительные, так и отрицательные давления и имеющие двухстороннюю шкалу с пределами от –20 до + 20 кПа;
– манометры абсолютного давления, измеряющие только значение P_a;
– дифференциальные манометры (дифманометры), измеряющие разность давлений.

Единицей измерения давления в системе СИ является паскаль (Па), а также кратные единицы кПа и МПа. Для удобства измерения больших давлений (больше атмосферного) искусственно ввели в систему СИ единицу, получившую название "бар" (1 Бар). При этом, 1 Бар, содержащий 10^5 Па незначительно отличается от одной атмосферы, т.е. 1 Бар≈1 ат.

На практике допускается применение внесистемных единиц, таких как:

1 мм вод. ст.=9,8 Па
1 мм рт. ст.=133,3 Па
1 кг/см^2 (1 техн. ат.)=0,98066·10^5 Па.

Применение единицы давления "миллиметр водяного (или ртутного) столба" особенно удобно в тех случаях, когда применяют жидкостные манометры с визуальным отсчетом высоты подъема жидкости.

В зависимости от принципа измерения давления все приборы можно разделить на три группы:

– жидкостные, в которых измеряемое давление уравновешивается давлением столба жидкости;
– деформационные (пружинные), где измеряемое давление определяется по величине деформации различных упругих чувствительных элементов;
– электрические, действие которых основано на преобразовании давления в какую-нибудь электрическую величину либо на изменении электрических свойств материала под действием давления;

– грузопоршневые, в которых измеряемое давление уравновешивается давлением, создаваемым массой поршня и грузов.

3.2 Жидкостные манометры

В жидкостных манометрах мерой измеряемого давления является высота неуравновешенной части столба жидкости в сообщающихся сосудах. Простейший жидкостный манометрический прибор состоит из U-образной стеклянной трубки и прямолинейной шкалы с наименьшей ценой деления 1 мм (рисунок 3.2). Оба конца трубки заполнены жидкостью примерно до половины своей высоты. В качестве рабочей жидкости используется вода или ртуть, отсюда давление измеряется в миллиметрах водяного или ртутного столба.

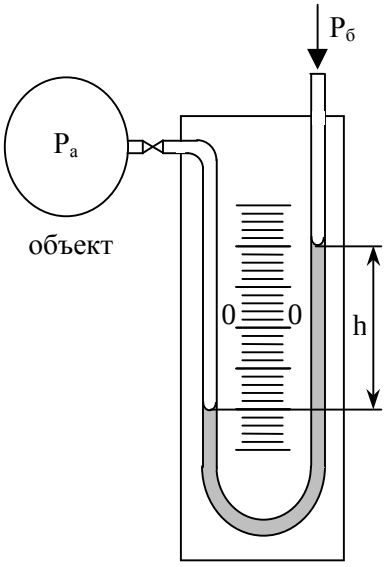


Рисунок 3.2 – Измерение избыточного давления U-образным манометром

Разница в диаметрах левой и правой частей трубки не влияет на результат измерения. Не обязательно также заполнять трубку жидкостью до уровня, точно совпадающего с нулевой отметкой, так как при отсчете показаний учитывается только разность уровней по количеству делений шкалы. При измерении давления один конец трубки подключается к объекту, другой сообщается с атмосферой. Столб жидкости h уравновешивает разность давлений:

$$P_а - P_б = \rho \cdot g \cdot h; \quad h = \frac{1}{\rho \cdot g}\left(P_а - P_б\right), \quad (3.1)$$

где $P_а$ – абсолютное давление газовой (жидкой) среды в объекте, Па;

$P_б$ – атмосферное давление в момент измерения, Па;

ρ - плотность рабочей жидкости, кг/м^3;

g – ускорение силы тяжести, м/с^2.

Равенство (3.1) показывает, что точность измерения давления определяется точностью отсчета высоты подъема жидкости h, точностью определения плотности рабочей жидкости ρ и не зависит от сечения трубки. Если плотность среды (жидкости или газа) в объекте заметно

отличается от плотности рабочей жидкости, заполняющей U-образную трубку, то выражение (3.1) примет следующий вид:

$$h = \frac{1}{g \cdot (\rho_1 - \rho_2)} (P_а - P_б) \qquad (3.2)$$

где ρ_1 – плотность рабочей жидкости, кг/м^3;

ρ_2 – плотность среды в объекте, кг/м^3.

Наибольшая абсолютная погрешность измерения давления h U-образным манометром составляет около 2 мм, что связано с неточностью считывания (фиксации) уровня жидкой среды в двух трубках манометра из-за наличия мениска (вогнутого при водяном заполнении и выпуклого при ртутном заполнении). Для уменьшения влияния капиллярных сил в манометрах используются стеклянные трубки диаметром от 8 до 10 мм.

Двухтрубные манометры с водяным заполнением используются для измерения давления, разряжения, разности давлений воздуха и неагрессивных газов в диапазоне до ± 10кПа. При заполнении манометра ртутью пределы измерения расширяются до 100 кПа, при этом, измеряемой средой могут быть вода, неагрессивные жидкости и газы. Такие пределы измерения обусловлены удобством визуального слежения за изменением уровня жидкости в стеклянных трубках манометра. В отдельных случаях при проведении исследований в лабораторных условиях пределы измеряемых давлений могут быть расширены, при этом, длина стеклянных трубок манометра может достигать более двух метров, что позволяет значительно снизить относительную погрешность измерения.

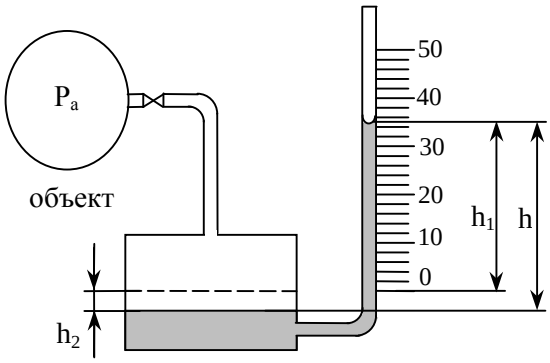


Рисунок 3.3 – Чашечный манометр

Для увеличения точности отсчета высоты столба рабочей жидкости используются чашечные однотрубные манометры (рисунок 3.3), в которых одна трубка заменена широким сосудом, диаметр которого в несколько раз больше диаметра трубки. При измерении избыточного давления широкий сосуд соединяется с объектом, а конец

сообщается с атмосферой, при этом уровень жидкости в трубке поднимется, а в широком сосуде опустится. При измерении вакуумметрического давления трубка соединяется с объектом, а широкий сосуд с атмосферой. При этом, жидкость в измерительной трубке будет подниматься до тех пор, пока вес столба жидкости не уравновесит разность между атмосферным давлением и вакуумом контролируемой среды.

В этом приборе точное давление или разряжение будет определяться как сумма высот опускания жидкости h_2 и подъема h_1:

$$h=h_1+h_2 \qquad (3.3)$$

Однако, на практике, из-за незначительного опускания жидкости в широком сосуде h_2, давление определяется только по величине h_1.

Оценим погрешность при таком способе измерения давления. Масса жидкости, вытесненная из широкого сосуда, равна массе, поступившей в измерительную трубку, т.е.

$$M_ч=M_т \quad \text{или} \quad h_2\cdot F_2\cdot\rho=h_1\cdot F_1\cdot\rho$$

Отсюда:

$$h_2=\frac{F_1}{F_2}h_1 \qquad (3.4)$$

Подставив полученное соотношение (между h_2 и h_1) в выражение (3.3), получим:

$$h=h_1\left(1+\frac{F_1}{F_2}\right) \text{ или } \quad h=h_1\left(1+\frac{d^2}{D^2}\right),$$

где d, D – диаметры соответственно широкого сосуда и трубки. Обычно соотношение диаметров составляет 1:20 и величина h составит:

$$h=h_1\left(1+\frac{1}{20^2}\right)=h_1(1+0{,}0025)\approx h_1$$

Таким образом, измерением уровня в широком сосуде можно пренебречь из-за незначительной погрешности. Измерение давления в чашечных манометрах по высоте подъема столба жидкости только в капилляре приводит к снижению погрешности считывания, которая с учетом погрешности градуировки шкалы не превышает ±1 мм, т.е. в два раза меньше, чем у двухтрубных (U-образных).

Минимальный диапазон измерения чашечных манометров с водяным заполнением составляет 1,6 кПа, при этом относительная приведенная погрешность измерения не превышает ±1%.

Для измерения малых давлений и разряжений (±2500 Па), а также для повышения точности измерения применяют чашечные манометры

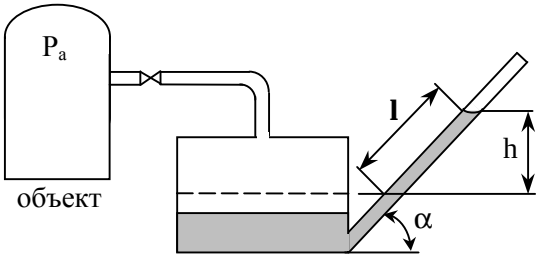


Рисунок 3.4 – Манометр с наклонной трубкой

с наклонной трубкой (рисунок 3.4), показания которых определяются по длине растекания рабочей жидкости в наклонной трубке манометра. Такие приборы получили название микроманометры и применяются как в лабораторной практике, так и в промышленных условиях при измерении давления и разряжения в топочном пространстве, а также тяги в дымовых трактах тепловых агрегатов. Наклонное положение трубки повышает точность измерения, так как при одном и том же значении высоты подъема жидкости h длина жидкости в трубке увеличивается при уменьшении угла наклона. При этом, измеренное давление в мм. вод. ст. при водяном заполнении определяется по формуле:

$$h = \mathbf{l} \cdot \sin\alpha \qquad (3.5)$$

Чаще всего в качестве рабочей жидкости в микроманометрах применяют этиловый спирт, так как он меньше смачивает стекло и дает большее, чем вода, значение цены деления прибора. При измерении в формулу (3.5) вводят поправку на плотность спирта:

$$h = \frac{\rho_1}{\rho_2} \mathbf{l} \cdot \sin\alpha, \qquad (3.6)$$

где ρ_1 – плотность спирта, кг/м^3;

ρ_2 – плотность воды, кг/м^3.

В микроманометрах с наклонной трубкой угол наклона трубки α может меняться и занимать одно из пяти фиксированных положений, которым соответствуют поправочные коэффициенты "К"=0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8, рассчитанные по формуле:

$$K = \frac{\rho_1}{\rho_2} \cdot \sin\alpha, \qquad (3.7)$$

в которой ρ_1=8095 кг/м^3 (плотность этилового спирта).

Недостатками жидкостных манометров являются отсутствие дистанционной передачи показаний и сравнительно небольшой предел измерений. Поэтому жидкостные приборы как стационарные в промышленности используются редко. Они широко распространены в

лабораторной практике и в промышленности при эпизодических измерениях и при контроле других приборов благодаря высокой точности измерения.

3.3 Деформационные манометры

В деформационных (пружинных) манометрах мерой измеряемого давления или разряжения является величина деформации упругих чувствительных элементов в виде их линейных или угловых перемещений.

В качестве упругих элементов в приборах давления чаще всего используются (рисунок 3.5) плоские мембраны (а), гофрированные мембраны (б), коробчатые гофрированные мембраны (в), сильфоны (г), сильфоны с цилиндрической пружиной (д) и трубчатые пружины (е) и др.

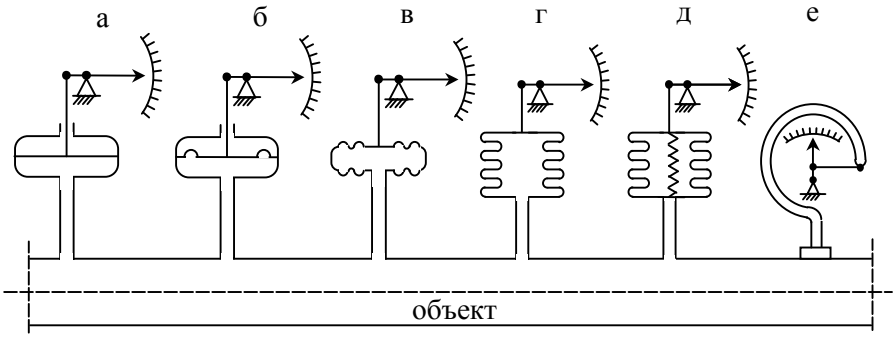


Рисунок 3.5 – Упругие чувствительные элементы

Для изготовления мембран, сильфонов и трубчатых пружин применяются материалы с высокой упругостью, антикоррозионностью, малой зависимостью параметров от изменения внешних условий и хорошо поддающиеся технологической обработке, пайке и сварке. Указанным требованиям отвечают бронза, латунь и хромоникелевые сплавы.

Одной из основных характеристик упругого чувствительного элемента является зависимость линейного (или углового) перемещения $\Delta \mathbf{l}$ определенной его точки от действующего давления, т.е. $\Delta \mathbf{l} = f(p)$. Такую характеристику, называемую статической, обычно при проектировании упругих чувствительных элементов стараются делать линейной:

$$\Delta \mathbf{l} = к \cdot \Delta P$$

Крутизна статической характеристики зависит от конструкции чувствительного (пружинного) элемента, материала, температуры. Рабочий диапазон выбирается в области упругих деформаций и зависит от упругости (коэффициента жесткости) пружинного элемента.

Для обеспечения надежной работы упругого чувствительного элемента необходимо, чтобы размер напряжений, возникающих в материале под действием внешних сил, не превышал предела упругости.

Вследствие несовершенства упругих свойств реальных материалов вид статической характеристики $\Delta \mathbf{l} = f(\Delta P)$ чувствительного элемента при увеличении и уменьшении нагрузки в пределах упругих деформаций неоднозначен и образует так называемую петлю гистерезиса. Размер гистерезиса является одной из важных характеристик пружинного элемента, так как определяет погрешность прибора. На размер гистерезиса оказывает влияние химический состав, структура материла и значение напряжений в материале чувствительного элемента. Гистерезис, а отсюда и величина погрешности, выражается в процентах:

$$\delta = \frac{\left(\Delta \mathbf{l}_1 - \Delta \mathbf{l}_2\right)_{\text{макс}}}{\Delta \mathbf{l}_{\text{макс}}} \cdot 100, \ \%, \qquad (3.8)$$

где $\left(\Delta \mathbf{l}_1 - \Delta \mathbf{l}_2\right)_{\text{макс}}$ - максимальная разность между перемещениями пружинного элемента при прямом и обратном измерении (ходе);

$\Delta \mathbf{l}_{\text{макс}}$ - максимальная величина перемещения пружинного элемента при максимально допускаемом измеряемом давлении для данного пружинного элемента.

Упругие чувствительные элементы изготовляют из достаточно пластичных материалов, которые имеют высокую упругость и прочность. Указанными свойствами обладают такие материалы как бронза, латунь, и хромоникелевые стали, которые имеют наилучшие технологические и эксплуатационные качества.

По классу точности манометры разделяются на технические , контрольные и образцовые. Технические манометры имеют классы точности 1,5; 2,5; 4; контрольные – 0,5 и 1,0; образцовые – 0,16 и 0,45.

Ниже рассматриваются наиболее распространенные типы упругих чувствительных элементов, применяемых в приборах давлениях.

Плоские мембраны. Плоская мембрана представляет собой тонкостенную мембрану постоянной толщины (рисунок 3.5 а), защемленную по краям. Под действием давления газа или жидкости мембрана

прогибается и передает перемещение своего центра через рычажную систему на стрелку показывающего прибора. Преимуществом манометров с плоской мембраной является устойчивость против вибраций. Такие манометры применяются для измерения давления не выше 2,5 МПа при погрешности от ±2,5 до ±4%. Плоские мембраны находят применение в приборах для измерения давления агрессивных жидкостей или вязких веществ, а также в приборах специальных конструкций, например, пьезокварцевых, емкостных, индуктивных, с тензопреобразователями и т.д. Приборы с плоскими мембранами обладают малой инерционностью и их можно использовать для измерения переменных давлений с частотой до нескольких сотен и тысяч герц.

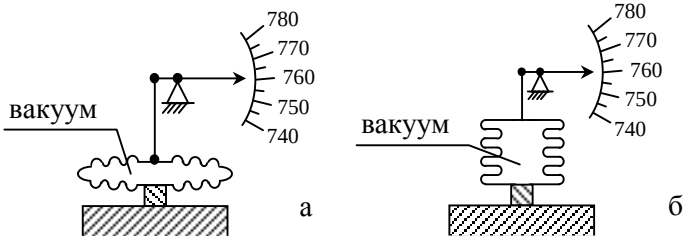
Гофрированные мембраны. Гофрированная поверхность мембраны в виде кольцевых волн (рисунок 3.5 б) позволяет получить линейную характеристику и значительно повысить надежность работы мембраны. Гофрированные одиночные мембраны в качестве чувствительных элементов применяются редко. Наибольшее применение в приборах давления (тягомерах, напоромерах, дифманометрах) получили коробчатые мембраны, образованные двумя спаянными или сваренными по внешней кромке гофрированными мембранами. Профили мембран могут быть пильчатыми, трапециидальными и синусоидальными. Коробчатые мембраны применяются в приборах для измерения сравнительно малых давлений, разрежений и перепадов давлений. Например, напоромеры и тягомеры имеют шкалы с верхним пределом измерения от 160 до 40000 Па; тягонапоромеры с нулем по середине шкалы от ±80 до ±20000 Па. Основная погрешность прибора составляет ±2,5%. Многие мембранные манометры снабжаются системой дистанционной передачи показаний с унифицированными электрическими или пневматическими сигналами.

Сильфонные манометры. Сильфон представляет собой тонкостенный цилиндр, боковая поверхность которого выполнена с поперечной гофрировкой (рисунок 3.5 г). Высота сильфона изменяется пропорционально приложенному давлению или перепаду давления, при этом, большее значение создается над сильфоном, а меньшее – внутри него. Максимальная величина рабочего хода (деформация) сильфона составляет 5-10 мм, что обуславливает самую высокую чувствительность по сравнению с другими типами пружинных элементов, применяемых в приборах для измерения давления. Большой рабочий ход сильфона и большое развиваемое усилие позволяет достаточно просто осуществлять запись показаний измеряемого давления на дисковой или ленточной диаграммной бумаге.

Сильфоны применяются в напоромерах и тягомерах для измерения небольшого давления до 25 кПа и разрежения до 100 кПа воздуха и неагрессивынх газов. Для увеличения жесткости и уменьшения влияния нелинейности характеристики внутрь сильфона помещают проволочную цилиндрическую винтовую пружину (рисунок 3.5 д). Вследствие этого измеряемое давление уравновешивается силой упругой деформации сильфона и винтовой пружины. Основная погрешность сильфонных манометров составляет 1,0…2,5%.

Барометры. Барометры предназначены для измерения атмосферного давления, т.е. абсолютного давления, производимого газовым слоем планеты Земля на земную поверхность.

Действие барометра основано на деформации коробчатой или сильфонной мембраны при измерении атмосферного давления (рисунок 3.6). Внутрення полость мембран герметична и находится под вакуумом (абсолютное давление во внутренней полости мембран составляет от 13 до 40 Па).



а – коробчатая мембрана; б – сильфонная мембрана

Рисунок 3.6 – Схема барометра (анероида)

Трубчатые манометры. Приборы с трубчатой пружиной принадлежат к числу наиболее распространенных манометров и вакуумметров. Манометры имеют чувствительный элемент в виде согнутой по кругу на угол ≈270° трубки овального или эллиптического сечения (рисунок 3.5е). Один конец трубки закрыт, а к другому через специальный штуцер подводится измеряемое давление. При повышении давления внутри трубки происходит деформация сечения в направлении приближения к круглому сечению, и это вызывает появление усилий, которые заставляют трубку разгибаться. Таким образом, величина перемещения конца трубки служит мерой измеряемого давления.

Тонкостенные трубчатые пружины применяют в приборах для измерения вакуумметрического давления до 0,1 МПа и избыточного

давления до 6 МПа. Для измерения избыточного давления от 20 до 160 МПа применяют толстостенные пружины овального сечения.

Разновидностью конструкции трубчатых манометров являются манометры с многовитковой (геликоидальной) трубчатой пружиной, применяемые чаще всего в качестве самопишущих приборов. Применение геликоидального полого пружинного элемента позволяет значительно повысить чувствительность прибора, что обусловлено большей величиной деформации пружины (большим углом поворота свободного конца пружины) по сравнению с одновитковой пружиной при одинаковом подведенном давлении.

Показывающие и самопишущие манометры могут иметь дополнительные устройства, осуществляющие замыкание электрической цепи при определенном значении измеряемого давления для автоматической сигнализации или позиционного регулирования давления газа или жидкости в каком-либо объекте. Электроконтактные приборы и реле давления применяют при автоматизации технологических процессов, в устройствах тепловой защиты агрегатов и реле других устройств. Электроконтактные приборы выпускают с показывающим отсчетным устройством, поэтому они могут быть использованы одновременно для целей измерения и сигнализации избыточного или вакуумметрического давления. Реле (или сигнализаторы) давления для целей измерения не могут быть использованы так, как они не имеют отсчетных устройств. На рисунке 3.7 показана схема электроконтактного манометра. В этом приборе в качестве упругого чувствительного элемента используется одновитковая трубчатая пружина. Внутри прибора расположены специальные электроконтакты 1, 2, 3. Установка электроконтактов 1 и 2 может произведена на любые отметки рабочей части шкалы манометра при помощи винтов, расположенных на лицевой части прибора.

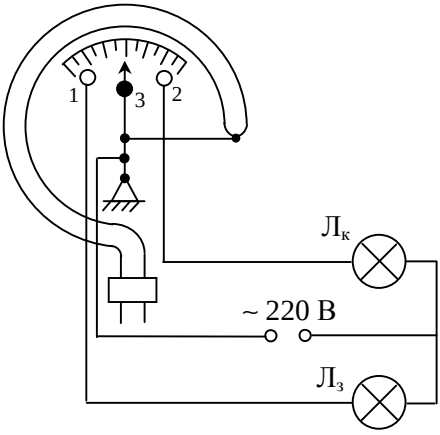


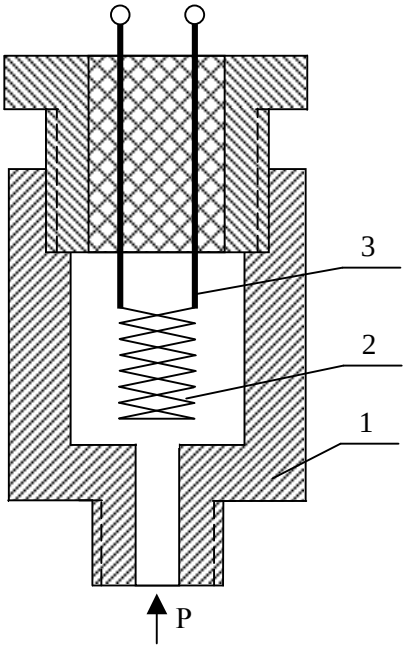
Рисунок 3.7 – Электроконтактный манометр

Если измеряемое давление среды в объекте уменьшится до нижнего заданного уровня, то показывающая стрелка с помощью контактов 3 и 1 замкнет электрическую цепь и включит лампу $Л_з$ (зеленого цвета). Если

же давление среды увеличится до верхнего заданного значения, то стрелка с помощью контакта 3 замкнет контакт 2 и при этом загорится сигнальная лампа $Л_к$ (красного цвета).

3.4 Электрические манометры

Электрические манометры имеют свою область измерения давления, в которой невозможно применить жидкостные и пружинные приборы. При измерении сверхвысоких давлений, глубокого вакуума и давления, изменяющегося с высокой частотой, применяются только электрические манометры, действие которых основано на преобразовании давления в какую-либо электрическую величину. Различают следующие типы электрических манометров: электрического сопротивления, пьезоэлектрические, термопарные, ионизационные, емкостные.



1 – корпус прибора; 2 – манганиновый резистор; 3 – медный токоотвод

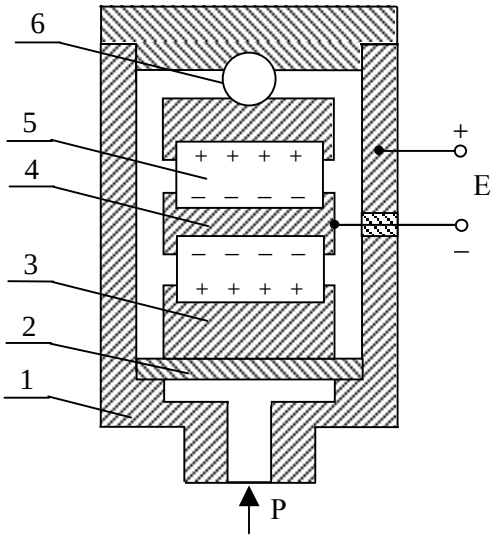
Рисунок 3.8 – Схема манометра сопротивления.

Принцип действия манометров сопротивления основан на изменении электрического сопротивления проводника в зависимости от внешнего давления. Для целей измерения давления, как показали экспериментальные исследования, в наибольшей степени подходит манганин, который имеет линейную зависимость сопротивления от давления. Кроме того, он обладает очень малым коэффициентом температурного расширения, что дает возможность не учитывать влияние температуры окружающей среды на электрическое сопротивление манганина.

Конструкция (схема) манометра с преобразователем из манганина показана на рисунке 3.8. Чувствительный элемент манометра представляет собой бифилярную катушку 1 с сопротивлением 180–200 Ом из проволоки диаметром 0,05 мм. Для измерения сопротивления манганиновой ка-

тушки применяют автоматические мосты или потенциометры, если требуются более точные измерения. Пределы допускаемой основной погрешности прибора не превышают ± 1%. Манометры сопротивления предназначены для измерения сверхвысоких давлений вплоть до 3000 МПа и применяются как в исследовательской практике, так и в промышленности, особенно при контроле процесса гидроэкструзии (обработка металлов при сверхвысоком давлении).

Пьезометрические манометры. Принцип действия манометров этого типа основан на использовании пьезоэлектрического эффекта, наблюдаемого у ряда кристаллов. Под действием давления на гранях некоторых кристаллических веществ (кварц, турмалин, титанат бария, двуокись кремния и др.) возникают электрические заряды. Если вырезать из пьезоэлектрического кристалла прямоугольную пластину и подвергнуть ее сжатию в направлении, перпендикулярном оптической и электрической осям кристалла, то на гранях, перпендикулярных этим осям, появятся электрические заряды, равные по значению и противоположные по знаку. Величина заряда прямо пропорциональна действующему давлению.



1 – корпус прибора; 2 – мембрана; 3 – металлическая опора; 4 – контактная пластина; 5 – пьезоэлемент; 6 шарик

Рисунок 3.9 – Схема пьезоэлектрического манометра

Наиболее широко используются кристаллы кварца, у которых пьезометрический эффект практически не зависит от температуры вплоть до 500°С. Кроме того, кристаллы кварца по сравнению с другими кристаллами обладают высокой механической прочностью. Схема пьезоэлектрического манометра приведена на рисунке 3.9. Измеряемое давление Р через мембрану 2 действует на два пьезоэлемента 5, расположенных так, что на их внутренних гранях, соприкасающихся с металлической прокладкой 4, возникают одноименные заряды. Вторые стороны кварцевых пластин (пьезоэлементов) прилегают

к металлическим опорам 3 и через них электрически замыкаются на корпус манометра. Шарик, находящийся между крышкой и верхней опорой, способствует равномерному распределению давления на поверхности кварцевых пластин. Нижняя часть корпуса имеет штуцер для соединения прибора с объектом измерения.

Положительный заряд при измерении давления отводится на корпус, а отрицательный заряд снимается контактной пластиной 4 и с помощью провода через изолирующую втулку подается на измерительное устройство. В качестве вторичного прибора для измерения возникающего потенциала Е используется осциллограф. Общая погрешность измерения не превышает 1,5…2,0 % при верхнем пределе измеряемого давления, составляющем 100 МПа.

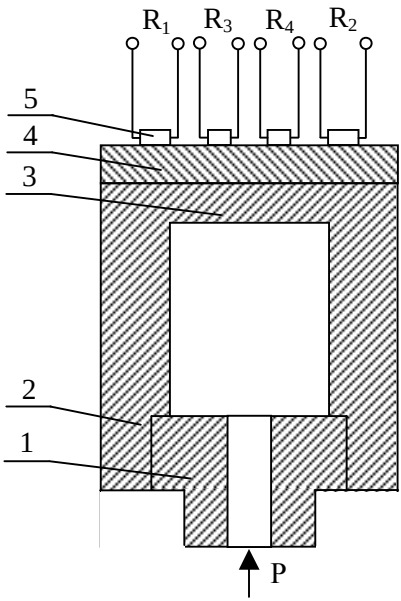
Достоинством пьезоэлектрического манометра является почти полная безинерционность, так как электрические заряды в кристаллах возникают сразу в момент возникновения давления. Пьезоэлектрические манометры применяются при измерении быстроизменяющихся давлений (взрывные процессы, диагностика двигателей внутреннего сгорания, обработка металлов давлением и др.).

Тензометрические манометры. Тензометрический метод измерения давления заключается в непосредственном преобразовании деформации упругого чувствительного элемента (мембраны) под воздействием давления в изменение электрического сопротивления резисторов, закрепленных на этом элементе. Это изменение сопротивления преобразуется электрической измерительной схемой в электрический выходной сигнал, пропорциональный величине измеряемого давления.

Резистор, сопротивление которого изменяется в зависимости от его деформации, называется тензорезистором. Схема тензометрического манометра приведена на рисунке 3.10. Манометр состоит из цилиндрического корпуса 2, верхняя часть которого образует упругую мембрану 3, а в нижней части имеется штуцер 1 для подвода измеряемого давления Р. К мембране припаяна круглая сапфировая пластина 4, на поверхность которой нанесены методом напыления тонкопленочные полупроводниковые тензорезисторы R_1, R_2, R_3, R_4 из монокристаллического кремния.

Тензорезисторы с помощью припаянных к ним выводных проводов соединены с электрическим преобразователем, расположенным конструктивно в корпусе тензометрического манометра.

Давление в манометре измеряется с использованием схемы неуравновешенного моста, плечами которого являются тензорезисторы



1 – штуцер; 2 – корпус прибора; 3 – упругая мембрана; 4 – сапфировая пластина; 5 – кремниевые резисторы

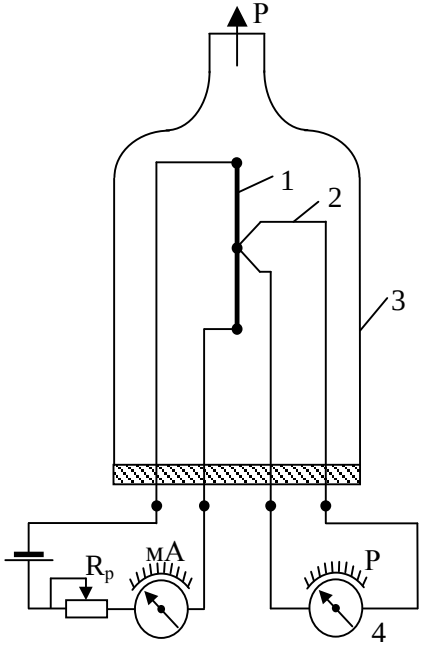
Рисунок 3.10 – Схема тензометрического манометра

R_1, R_2, R_3, R_4. Под действием измеряемого давления мембрана 3 с сапфировой пластинкой 4 и тензорезисторами подвергается деформации. Тензорезисторы R_1 и R_2 расположены в радиальном направлении, что приводит при деформации к уменьшению их сопротивления, а тензорезисторы R_3 и R_4 - в окружном направлении, что вызывает увеличение их сопротивления. Такое расположение тензорезисторов на сапфировой пластине при соответствующем их соединении в электрической цепи мостовой схемы значительно повышает чувствительность тензометрического манометра. В результате при деформации возникает разбаланс моста в виде напряжения, которое усиливается с помощью встроенного в корпус манометра микроэлектронного усилителя. Усилитель выдает стандартный сигнал 0 – 5 мА (пропорциональный измеряемому давлению) для дистанционной передачи на вторичный измерительный прибор, который имеет градуировку в единицах давления.

Верхний предел показаний манометра 0,1 – 40 МПа при классе точности различных модификаций приборов 0,6; 1,0 и 1,5. Тензометрические манометры имеют малые габариты, простое устройство, высокую точность и надежность в работе, что позволяет использовать их для измерения давления в сложных производственных условиях.

Тепловые ваккумметры. Принцип действия тепловых вакуумметров основан на зависимости теплопроводности газовой среды от степени ее разряжения. Они предназначены для измерения абсолютного давления газовой среды в интервале 1,1 – 10^4 Па, т.е. в области среднего значения вакуума. Для измерения абсолютного давления в ука-

занном интервале применяются два конструктивных варианта тепловых вакуумметров: *термопарный* и *сопротивления*. В обеих конструкциях чувствительным элементом является нагретая путем пропускания электрического тока платиновая нить, расположенная в вакуумном баллоне. При увеличении разрежения газовой среды ее теплопроводность будет уменьшаться, следовательно, нагретая платиновая или вольфрамовая нить будет хуже отдавать тепло стенкам баллона, в результате чего ее температура будет возрастать. Измеряя температуру нити или ее сопротивление, можно измерять величину вакуумметрического давления в объекте.



1 – платиновая нить; 2 – термопара; 3 – вакуумный баллон; 4 – измерительный прибор

Рисунок 3.11 – Схема термопарного вакуумметра

На рисунке 3.11 показана схема термопарного вакуумметра. Внутри стеклянного баллона 3, вакуумно плотно подсоединенного верхней частью к объекту измерения давления, находится платиновый нагреватель. Чтобы значительно уменьшить теплопередачу от нити к стенкам баллона за счет излучения, максимальная температура нити должна быть примерно 100°С. Перед началом измерения температура нити, равная 100°С, устанавливается при помощи регулировочного реостата R_p и контрольного миллиамперметра.

Температура платиновой нити измеряется в ее центре хромель – копелевой термопарой, которая связанна с измерительным милливольтметром, отградуированным в единицах давления.

В тепловых вакуумметрах сопротивления, в которых чувствительным элементом является нагретая до температуры 200°С вольфрамовая нить, используется неуравновешенный мост. На рисунке 3.12 приведена электрическая схема теплового вакуумметра. Три плеча

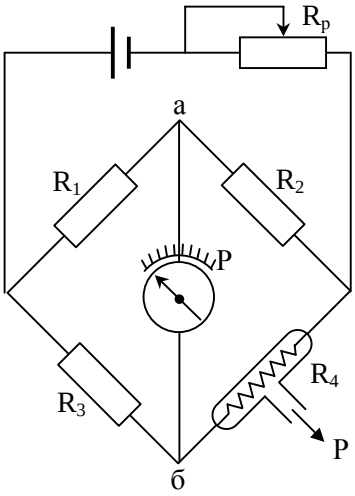


Рисунок 3.12 – Схема теплового вакуумметра сопротивления

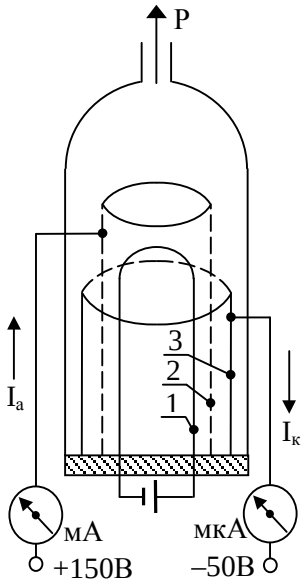
моста состоят из постоянных сопротивлений R_1, R_2, R_3, а четвертое R_4 представляет собой тонкую вольфрамовую нить, находящуюся в камере, к которой подсоединяется объект измерения давления. При низких давлениях снижается концентрация молекул в газовой среде и длина свободного пробега молекул становится соизмеримой с размерами газовой камеры. Это приводит к резкому уменьшению передачи тепла теплопроводностью от нагретой нити к стенкам камеры через газовую среду. Температура вольфрамовой нити, а значит, и ее электрическое сопротивление, увеличивается пропорционально снижению давления. Напряжение в измерительной диагонали мостовой схемы между точками а – б (разбаланс моста) также будет определяться величиной измеряемого давления. Измерительный прибор (милливольтметр), отградуированный в единицах абсолютного давления, покажет величину вакуумметрического давления в объекте.

Теплоотдача от вольфрамовой нити зависит как от числа молекул, участвующих в переносе тепла, так и от температуры стенок камеры. Для снижения влияния на показания прибора колебаний температуры окружающей среды, газовая камера с вольфрамовой нитью помещается в вакуумную камеру, образуя термос с хорошей тепловой изоляцией.

Нижний предел измерения прибора ограничивается возрастанием по мере снижения теплопроводности роли лучистого теплообмена, который становится главным при давлении ниже 10^{-1} Па.

Ионизационный вакуумметр. Для измерения сверхнизкого абсолютного давления в диапазоне 10^{-1} – 10^{-8} Па используются ионизационные вакуумметры. Принцип действия таких приборов основан на ионизации молекул газа потоком электронов с последующим измерением ионизационного тока, который зависит от величины абсолютного давления газовой среды.

Основным элементом ионизационного вакуумметра является стеклянная вакуумметрическая лампа (рисунок 3.13), содержащая катод 1, который находится внутри анодной сетки 2, окруженной цилиндрическим ионным коллектором 3. Катод 1, нагретый до высокой температуры, испускает электроны, которые ускоряются положительным напряжением, приложенным между сеточным анодом 2 и катодом 1. При движении электроны сталкиваются с молекулами газа, ионизируя их. Положительные ионы попадают на отрицательно заряженный коллектор 3. При постоянстве анодного напряжения величина коллекторного тока и $I_к$ зависит от измеряемого давления, так как количество образующихся ионов непосредственно зависит от количества молекул в газовом объеме лампы. Теоретически, в пределе, коллекторный ток будет равен нулю при абсолютном вакууме. Однако, практически нижний предел измерения давления ионизационными вакуумметрами ограничен фоновым током, вызванным мягким рентгеновским излучением и фотоэлектронной эмиссией коллектора.



1 – катод; 2 – анодная сетка; 3 – ионный коллектор

Рисунок 3.13 – Схема ионизационного вакуумметра

Величина измеряемого давления определяется по показаниям микроамперметра (мкА) с использованием градуировочной характеристики для данного типа ионизационного вакуумметра.

Относительная погрешность большинства типов рабочих вакуумметрическим манометров не превышает ±30%. Приборы для измерения среднего и глубокого вакуума, использующие электрические и тепловые эффекты, применяются для контроля технологических процессов связанных с применением среднего и глубокого вакуума: вакуумирование жидкого металла и веществ, система водоподготовки и конденсаторные установки на тепловых электростанциях; вакуумная обработка пищевых продуктов и др.

4 ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ГАЗА, ЖИДКОСТИ И ПАРА

4.1 Общие сведения

Во всех отраслях промышленности для оперативного контроля, регулирования и управления технологическими процессами необходимо вести постоянный учет расхода газообразных сред (горючих газов, кислорода, воздуха и др.), жидкостей (воды, жидкого топлива, жидких химических веществ и др.), энергетического и теплофикационного пара. Точное измерение расхода этих сред позволяет определять и сравнивать экономическую эффективность работы однотиповых агрегатов, совершенствовать и выбирать прогрессивные технологические процессы, приводящие к экономии энергоресурсов и повышению конкурентоспособности выпускаемой продукции.

При измерениях, связанных с учетом количества вещества необходимо различать понятия расход и количество вещества.

Расход есть количество вещества, протекающего через сечение трубопровода (или канала другого сечения) в единицу времени, т.е. мгновенное значение расхода. В соответствии с выбранными единицами может производиться измерение либо массового расхода (кг/с, кг/ч, т/ч), либо объемного расхода ($м^3$/с, $м^3$/ч, л/с). Единицы массы дают более полные сведения о расходе вещества, чем единицы объема, т.к. объем вещества, особенно газов, зависит от давления и температуры. При измерении объемных расходов газов для получения сопоставимых значений результаты измерения приводят к нормальным условиям (температура $t_н$=20°С, давление $P_н$=101325 Па, относительная влажность φ=0).

Количество – это общий объем или масса вещества, протекающего через трубопровод за конкретный интервал времени (т.е. за весь промежуток времени) за час, сутки, месяц, год и т.д.

Измерительный прибор, служащий для измерения расхода вещества, называется расходомером, а прибор для измерения количества вещества – счетчиком количества (счетчиком). В каждом конкретном случае к этим терминам следует добавлять наименование контролируемой среды, например, расходомер природного газа или водяной счетчик.

Для измерения расхода и количества газообразных и жидких сред, а также пара используются различные методы и средства, что

связано как с различием физических и теплофизических свойств этих веществ, так и с различными требованиями к точности измерения рабочих, образцовых и эталонных приборов.

В данном разделе рассмотрены наиболее распространенные, а также перспективные методы измерения расхода пара, газа и жидкости.

4.2 Расходомеры по перепаду давления в сужающем устройстве

Одним из наиболее распространенных и широко применяемых непрерывных методов измерения расхода в промышленности и в лабораторной практике является метод переменного перепада давления. Он позволяет измерять расход любых газовых, жидких сред, а также пара в широком диапазоне температур, давлений, влажности, состава. Аппаратурное исполнение используемое в расходомерах переменного перепада, отличается простотой конструкции, надежностью, низкими эксплуатационными затратами и достаточной точностью измерения расхода.

Метод измерения расхода по перепаду давления основан на зависимости перепада давления в сужающем устройстве, установленном в трубопроводе (или в канале другой формы), от расхода измеряемой среды. При протекании потока через отверстие сужающего устройства повышается скорость потока по сравнению со скоростью до сужения. Увеличение скорости потока приведет к увеличению динамического давления и снижению статического давления согласно закона сохранения энергии, т.е. произойдет перераспределение кинетической и потенциальной энергии движущейся среды. Соответственно статическое давление в суженном сечении будет меньше, чем в сечении до сужающего устройства.

Таким образом, при протекании вещества через сужающее устройство создается перепад статического давления $\Delta P=P_1-P_2$, зависящей от скорости потока и, следовательно, расхода среды. Перепад давления, создаваемый сужающим устройством может служить мерой расхода вещества, протекающего в трубопроводе.

Использование рассматриваемого метода измерения требует выполнения следующих условий:

- характер движения потока до и после сужающего устройства должен быть турбулентным и стационарным;
- поток должен полностью заполнять все сечение трубопровода;
- фазовое состояние потока не должно изменяться при его те-

чении через сужающее устройство;
- во внутренней полости трубопровода до и после сужающего устройства не образуются осадки и другие виды загрязнений;
- на поверхностях сужающего устройства не образуются отложения, изменяющие его геометрию;
- пар должен быть перегретым для исключения конденсации и приближения его свойств к свойствам газообразных сред.

В качестве сужающих устройств для измерения расхода жидкостей, газов и пара широко применяют стандартные диафрагмы, сопла и сопла Вентури. Стандартными называются сужающие устройства, которые изготовлены и установлены в соответствие с руководящими нормативными документами, разработанными государственной метрологической службой. Градуировочная характеристика стандартных сужающих устройств, т.е. зависимость перепада давления от расхода, может быть определена расчетным путем без индивидуальной градуировки. Градуировочные характеристики нестандартных сужающих устройств определяются в результате индивидуальной градуировки.

Диафрагма, показанная на рисунке 4.1, представляет собой тонкий диск с отверстием круглого сечения, центр которого лежит на оси трубы. Передняя (входная) часть отверстия имеет цилиндрическую форму, а затем переходит в коническое расширение. Передняя кромка должна быть острой без закругления и заусениц. Стандартные диафрагмы устанавливают на трубопроводах диаметром не менее 50 мм.

Сужение потока начинается до диафрагмы и на некотором расстоянии за диафрагмой в плоскости В–В поток достигаем минимального сечения F_2 вследствие инерции струи. В этом сечении средняя скорость потока возрастает до максимально значения, при этом, увеличивается кинетическая энергия потока и уменьшается потенциальная, а значит, уменьшается соответственно и статическое давление до значения P'_2.

Распределение статического давления вдоль стенки трубопровода показано на рисунке 4.1. Перед диафрагмой статическое давление несколько возрастает от P'_1 до P_1 из-за внезапного торможения, за диафрагмой скорость возрастает и происходит падение статического давления до P'_2. После сечения В–В начинается расширение струи, которое заканчивается в сечении С–С. Этот процесс сопровождается уменьшением скорости и увеличением статического давления. В сечении С–С скорость принимает первоначальное значение (как в сечении А–А), но давление будет меньше первоначального на величину $\Delta P_{пот}$, называемое потерей давления в сужающем устройстве. Необратимая

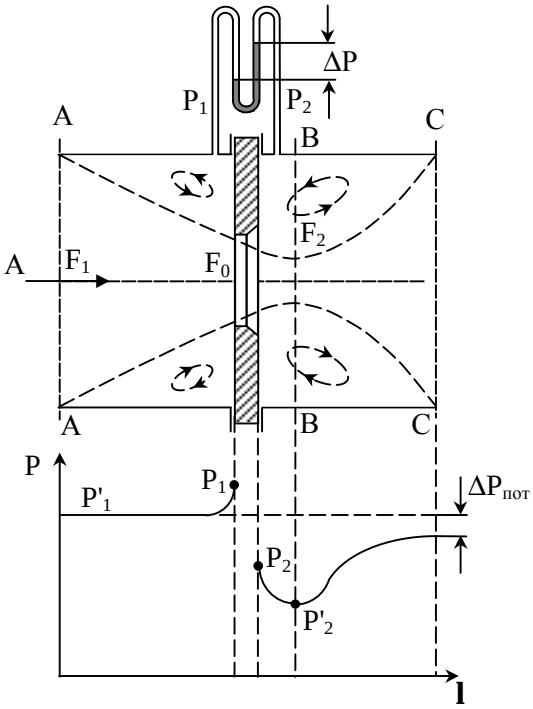


Рисунок 4.1 – Распределение статических давлений в зоне расположения сужающего устройства

потеря давления вызвана потерей энергии на местном сопротивлении (диафрагме) из-за сильного вихреобразования в мертвых зонах до и после диафрагмы.

Как видно из рисунка 4.1, отбор давлений P_1 и P_2 осуществляется с помощью двух отдельных отверстий, расположенных непосредственно до и после диска диафрагмы. Перепад давления на диафрагме может измеряться различными приборами – дифманометрами с непосредственным получением значения расхода (жидкостные и пружинные манометры) или с электрическим преобразованием с дальнейшим измерением электрического сигнала вторичным прибором.

Для вывода уравнения расхода по перепаду давления на сужающем устройстве предположим вначале, что жидкость несжимаема (т.е. плотность жидкости не изменяется при прохождении через сужающее устройство), потери давления равны нулю, отсутствует теплообмен с окружающей средой и трубопровод расположен горизонтально. Применяя уравнение Бернулли для двух сечений А–А и В–В, запишем

$$P'_1 + \frac{W_1^2}{2}\rho = P'_2 + \frac{W_2^2}{2}\rho\,. \qquad (4.1)$$

где P'_1 и P'_2 - статическое давление в сечениях А–А и В–В, Па;

W_1 и W_2 – средняя скорость потока в сечениях А–А и В–В, м/с.

В уравнении 4.1 неизвестными величинами являются скорости потока W_1 и W_2, а величины P'_1 и P'_2 можно измерить непосредственно дифманометром. Поэтому для вывода уравнения расхода воспользуемся условием неразрывности (сплошности) потока, т.е. масса вещества, проходящего через сечение А–А равна массе вещества проходящего через сечение В–В. Согласно условию неразрывности потока можно записать:

$$F_1 \cdot W_1 = F_2 \cdot W_2 \qquad (4.2)$$

Самое узкое сечение струи F_2, выходящей из сужающего устройства, трудноизмеряемая величина, поэтому F_2 выражают через площадь отверстия сужающего устройства F_0 и коэффициент сужения:

$$F_2 = \mu \cdot F_0 . \qquad (4.3)$$

Площадь сечения F_0 можно выразить через площадь сечения трубопровода F_1, используя так называемый модуль диафрагмы "m" (т.е. степень диафрагмирования):

$$\frac{F_0}{F_1} = m \text{ и } F_0 = m \cdot F_1 . \qquad (4.4)$$

Таким образом, площадь сечения узкого потока F_2 выразится через коэффициенты "μ" и "m":

$$F_2 = \mu \cdot m \cdot F_1 . \qquad (4.5)$$

Решая совместно уравнения 4.1 и 4.5, получим значение средней скорости измеряемой среды в самом узком сечении F_2:

$$W_2 = \frac{1}{\sqrt{1-\mu^2 \cdot m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho}(P`_1 - P`_2)} . \qquad (4.6)$$

На практике статическое давление измеряется в непосредственной близости от сужающего устройства, т.е. P_1 и P_2, поэтому в формулу (4.6) вводят поправочный коэффициент ξ и уравнение для средней скорости W_2 примет вид:

$$W_2 = \frac{\xi}{\sqrt{1-\mu^2 \cdot m^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)} . \qquad (4.7)$$

Определив скорость W_2, можно найти расход жидкой или газообразной среды, протекающей через трубопровод, по уравнению:

$$V = W_2 \cdot F_2 . \qquad (4.8)$$

Используя уравнения 4.3, 4.7 и 4.8, можно записать в окончатель-

ном виде уравнение расхода для сужающих устройств:

$$V = \frac{\mu \cdot \xi}{\sqrt{1-\mu^2 \cdot m^2}} \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)}, \frac{м^3}{с}. \quad (4.9)$$

Коэффициенты μ и ξ трудно определяемые величины как практически, так и теоретически. Поэтому их объединяют в один общий коэффициент, получивший название "коэффициент расхода", в который входит также и коэффициент диафрагмирования потока (модуль диафрагмы) "m":

$$\alpha = \frac{\mu \cdot \xi}{\sqrt{1-\mu^2 \cdot m^2}} \quad (4.10)$$

Таким образом, уравнение расхода несжимаемой среды (т.е. плотность до и после диафрагмы не изменяется) принимает вид:

$$V = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)}, \frac{м^3}{с}. \quad (4.11)$$

Это уравнение можно использовать также для определения массового расхода среды:

$$G = V \cdot \rho = \alpha \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_2)}, \frac{кг}{с} \quad (4.12)$$

При измерении расхода сжимаемой среды (газа или пара) плотность ρ среды изменяется при прохождении через сужающие устройства вследствие изменения давления. Это учитывается введением в уравнения расхода поправочного множителя на расширение измеряемой среды ε. Уравнения расхода для сжимаемой среды принимают вид:

$$V = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot (P_1 - P_2)}, \frac{м^3}{с}. \quad (4.13)$$

$$G = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \cdot \sqrt{2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_2)}, \frac{кг}{с} \quad (4.14)$$

где ρ - плотность среды до сужающего устройства.

Полученные формулы являются основными для измерения расхода жидких и газообразных сред при использовании сужающих устройств. Выведенные уравнения могут применяться, когда скорость потока в сужающем устройстве не достигает критической, т.е. скорости звука в данной среде.

Использование на практике полученных формул предполагает,

что значения ρ, F_0, α и ε не должны меняться при различных значениях расхода. Тогда они могут быть объединены в один коэффициент.

Как показывают экспериментальные исследования, коэффициент расхода α является постоянным только в определенном ограниченном интервале изменения расхода. По данным исследований величина α является функцией числа Рейнольдса Re и зависит также от параметра сужающего устройства – величины "m". На рисунке 4.2 показаны зависимости коэффициента расхода от Re и m.

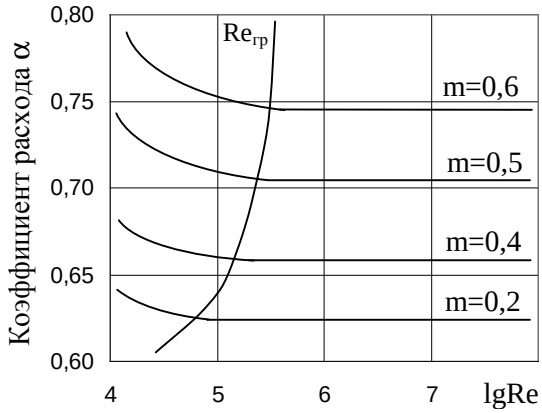


Рисунок 4.2 – Зависимость коэффициента расхода стандартных диафрагм от числа Рейнольдса при различных значениях m.

Как видно из приведенных экспериментальных данных (рисунок 4.2), коэффициент расхода α после некоторого граничного значения критерия Рейнольдса $Re_{гр}$ становится практически постоянным. Линия, соединяющая граничные значения $Re_{гр}$, делит всю область значений α на две части: левую – где α зависит от Re (т.е. от расхода среды) и правую – где α не зависит от Re. Поэтому, при измерении расхода необходимо, чтобы значение числа Re было больше $Re_{гр}$, к тому же в формулы расхода не требуется вводить поправку на вязкость среды. Граничные значения чисел Рейнольдса для стандартных сужающих устройств в зависимости от "m" приведены в таблице 4.1.

По данным таблицы 4.1 можно определить тот минимальный расход среды, при котором коэффициент α остается постоянным и перепад давления будет однозначно определяться только расходом протекающей через сужающее устройство жидкой или газообразной среды.

Для практического использования полученные уравнения расхода (4.13) и (4.14) обычно представляются в другой записи:

$$V = 0{,}01252 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}, \frac{м^3}{с}. \qquad (4.15)$$

Таблица 4.1 – Граничные значения $Re_{гр}$ для стандартных сужающих устройств

m	Значение $Re_{гр}$	
	для диафрагм	для сопл и сопл Вентури
0,10	30000	66000
0,20	57000	90000
0,30	90000	125000
0,40	134000	165000
0,50	185000	190000
0,60	240000	200000
0,70	300000	-

$$G = 0{,}01252 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\rho \cdot \Delta P}, \frac{кг}{с} \qquad (4.16)$$

Входящие в эти формулы расхода (объемного и массового) величины должны иметь следующие размерности:

d – диаметр сужающего устройства, мм;

ΔP – перепад давления на сужающем устройстве, мм вод. ст.;

ρ – плотность измеряемой среды, кг/м^3.

Расчет градуировочной характеристики сужающего устройства предполагает вычисление численного значения α, ε, d, ρ, входящих в уравнения расхода (4.15) и (4.16) в рабочих условиях при известном диаметре проходного отверстия сужающего устройства и трубопровода в нормальных условиях. После установления количественного соотношения между V(G) и ΔP по измеренному в реальных условиях с помощью дифманометра перепаду давления на данном сужающем устройстве может быть вычислен расход среды через него.

Коэффициент расхода α, входящий в уравнения (4.15) и (4.16), называется расчетным. Он характеризует реальные условия работы сужающего устройства: наличие шероховатости среды и притупление входной кромки отверстия (для диафрагм). Исходное (или начальное) значение α определяется для каждого типа сужающих устройств по специальным таблицам или графикам. Входной величиной для определения α является модуль сужающего устройства "m", который определяется по формуле (4.4) при известных диаметрах трубопровода и входного отверстия сужения.

Изменение величины α, вызванное притуплением входной кромки диафрагмы и шероховатостью трубопровода, учитывается введением поправочных коэффициентов $К_п$ – на притупление входной кромки и $К_ш$ – на шероховатость внутренних стенок трубопровода. Коэффициенты $К_п$ и $К_ш$ зависят от величины "m" и диаметра трубопровода и определяются по специальным таблицам.

Таким образом, расчетный коэффициент расхода α с учетом поправочных коэффициентов определяется по формуле:

- для диафрагм $\alpha=\alpha_и \cdot К_ш \cdot К_п$ (4.17)
- для сопл $\alpha=\alpha_и \cdot К_ш$ (4.18)

Поправочный коэффициент ε на расширение измеряемой среды вводится вследствие изменения ее плотности при прохождении сужающего устройства. Этот коэффициент для жидких сред равен единице (жидкость практически несжимаема), а для газов и паров зависит от перепада давления ΔP на сужающем устройстве, модуля "m" и показателя адиабаты для этих сред. Зависимость коэффициента ε от этих величин определяется по таблицам или номограммам.

Диаметры сужающего устройства и трубопровода обычно задаются значениями при температуре 20°С и обозначаются соответственно d_{20} и D_{20}. Входящие в уравнения расхода d или D при рабочей температуре t, которая может отличаться от 20°С, определяются по формулам:

$$d = k'_t \cdot d_{20};\ D = k''_t \cdot D_{20},$$

где k'_t и k''_t - поправочные коэффициенты на расширение материала сужающего устройства и трубопровода, определяемые по рабочей температуре и марке стали. Если температура измеряемой среды находится в интервале – 20… +50 °С, то $k'_t = k''_t = 1$.

Плотность измеряемой среды, входящей в уравнение расхода, определяется по температуре и абсолютному давлению этой среды, движущейся в трубопроводе. По измеренным температуре и давлению плотность определяется по справочным таблицам для конкретных жидких, газовых сред и пара.

Вычисленные α, ε, d, ρ, будучи подставленными в формулы расхода (4.15) и (4.16), позволяют получить градуировочную характеристику сужающего устройства, с помощью которой определяют расход по измеряемому перепаду давления.

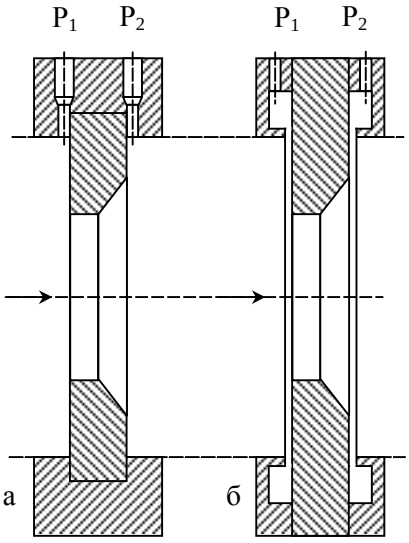
В эксплуатационных условиях возможно отклонение значения плотности измеряемой среды от градуировочной величины из-за рез-

ких изменений температуры и давления. В этом случае в показание расходомера необходимо вводить поправку на изменение плотности, т.е. умножить на коэффициент:

- для объемного расходомера $C = \sqrt{\rho_{гр} / \rho}$;
- для массового расходомера $C = \sqrt{\rho / \rho_{гр}}$.

В настоящее время выпускаются некоторые типы расходомеров, в которых имеется электронный блок для автоматического введения поправки при изменении плотности среды в процессе измерения расхода.

Типы сужающих устройств. На практике в зависимости от конкретных условий измерений применяются различные типы сужающих устройств. Наиболее распространенным типом сужающих устройств для измерения расхода жидких, газообразных сред и пара являются стандартные диафрагмы. Они являются самыми простыми в изготовлении сужающими устройствами и применяются при соблюдении требования $0{,}005 \le m \le 0{,}7$ для трубопроводов диаметром не менее 50 мм. Диафрагма для трубопроводов диаметром не менее 50 мм (рисунок 4.3 а, б) представляет собой тонкий диск, зажатый на фланцах, с круглыми концентрическими отверстиями. Со стороны входа отверстие имеет острую прямоугольную крышку, а выходная часть отверстия растачивается на конус под углом 30–40°. Для больших диаметров трубопроводов, более 500 мм, диафрагмы изготавливается без конического расширения. Все размеры диафрагмы являются расчетными относительно диаметра трубопровода D.



а – диафрагма с отдельными отверстиями;
б – камерная диафрагма

Рисунок 4.3 – Типы диафрагм

Отбор давления P_1 и P_2 осуществляется через отдельные цилиндрические отверстия на фланцах диафрагмы для трубопроводов диаметром от 450 до 1600 мм. Для трубопроводов < 450 мм отбор давления осуществляется при помощи кольцевых камер (рисунок 4.4 б). Диафрагмы с кольцевыми камерами (камерные диафрагмы) менее чувствительны к местным возмущениям и несимметричности потока, позволяют выравнивать давление и производить более точное измерение перепада давления при меньших длинах прямых участков трубопровода. Недостатком камерных диафрагм является их большая толщина (50-60мм), затрудняющая ее установку и большой расход металла на изготовление при больших диаметрах трубопроводов.

В отдельных случаях, когда необходимо значительно уменьшить потери давления при измерении расхода, принимают в качестве сужающих устройств сопла и сопла Вентури.

Нормализованное сопло (рисунок 4.4) представляет собой сужение в виде насадки с плавно закругленным профилем со стороны входа струи, заканчивающейся короткой цилиндрической частью. Торцевая часть сопла на входе потока имеет цилиндрическую выточку для предохранения выходной кромки цилиндрической части сопла от повреждения. Сопла применяются при измерении расходов газа, перегретого пара высокого давления и агрессивных жидкостей в трубопроводах диаметром от 50 до 200 мм. Сопло менее чувствительно к загрязнению потока и влиянию коррозии и позволяет измерять большие расходы с меньшей погрешностью и требует меньших длин прямых участков трубопроводов при установке, чем диафрагма.

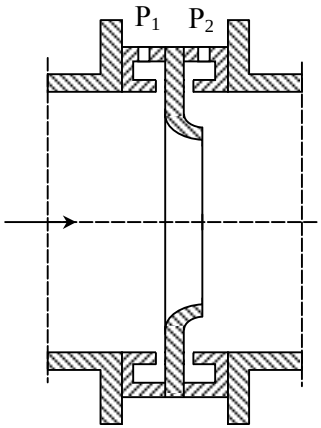


Рисунок 4.4 – Стандартное сопло

Сопло Вентури, имеющее профилированную входную часть, состоит из цилиндрической части и конической выходной части – диффузора (рисунок 4.5). Отбор давлений P_1 и P_2 осуществляется через две кольцевые камеры, одна из которых располагается до сужения, а вторая – в самом узком месте сопла Вентури.

Все сужающие устройства создают при прохождении потока безвозвратную потерю давления, величина которой зависит как от типа сужающего устройства, так и от величины "m", т.е. от степени сужения потока. Поэтому,

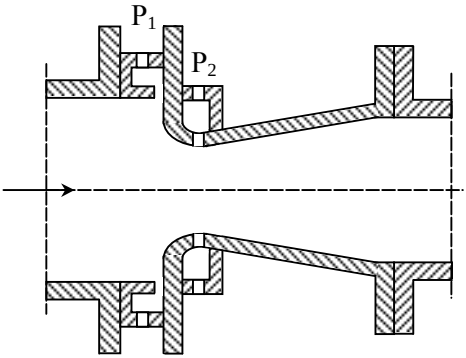
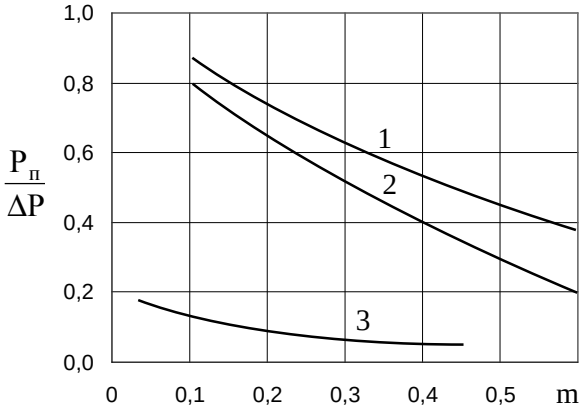


Рисунок 4.5 – Стандартное сопло Вентури

при выборе типа сужающего устройства и его геометрических параметров следует учитывать допустимую потерю давления для данного технологического процесса.

Потерю давления измеряемой среды, протекающей через сужающее устройство определяют как разность статических давлений, измеренных до и после сужающего устройства на некотором расстоянии от него. Потеря давления в сужающем устройстве обычно выражается в долях или процентах от перепада давления на сужающем устройстве. На рисунке 4.6 приведена зависимость потери давления, выраженная в долях перепада, для разных сужающих устройств при различном значении модуля "m". Из графиков видно, что диафрагма обладает самой большой потерей давления при любых условиях измерения (кривая 1). У сопла Вентури, благодаря наличию диффузора, сохраняется форма струи и поток не отрывается от стенок канала, а следовательно, и потери давления (кривая 3) в таких устройствах наименьшее по сравнению с другими типами сужающих устройств. Сопло Вентури рекомендуется применять в тех случаях, когда в промышленных установках при из-



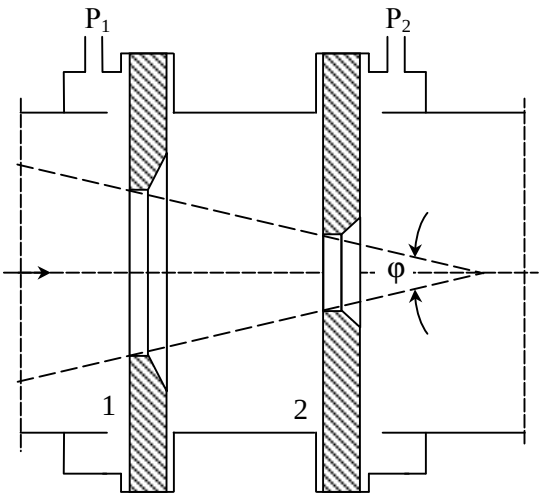
1 – диафрагма; 2 – сопло; 3 – сопло Вентури

Рисунок 4.6 – Потери давления в сужающих устройствах

мерении расхода вещества большие потери давления недопустимы (специальные горелочные устройства).

Особые случаи измерения расхода. На практике часто встречаются такие случаи, когда необходимо измерять расход вязких веществ (мазута, смол, масел, газов с малой плотностью) и при малых диаметрах трубопроводов (меньше 50 мм). При таких условиях режим течения веществ в трубопроводах характеризуется малыми числами Рейнольдса, т.е. поток слаботурбулентный. Как отмечалось выше, при значениях чисел Re ниже граничных, коэффициент расхода не является постоянной величиной для стандартных сужающих устройств. Для таких случаев измерения расхода разработан ряд специальных сужающих устройств, из которых можно отметить такие виды диафрагм: сдвоенная, с профилем в четверть круга, без цилиндрической части, с двойным скосом. Наибольшее распространение получили сдвоенные диафрагмы, которые обеспечивают надежные результаты измерения и постоянство коэффициента расхода при малых значениях чисел Рейнольдса.

Сдвоенная диафрагма (рисунок 4.7) представляет собой устройство, состоящее из основной 1 и дополнительной 2 диафрагм, установленных друг от друга на расстоянии, составляющем половину диаметра трубопровода. Дополнительная диафрагма, помещаемая перед основной, имеет больший диаметр проходного сечения. Она направляет поток в основную диафрагму под углом $\varphi \approx 28°$. В таких устройствах удается получить коэффициенты расхода постоянными в широком интервале чисел Рейнольдса от $3 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^5$. Потеря давления в сдвоенных диафрагмах меньше, чем в обычной но больше, чем у сопла. Отбор давлений P_1 и P_2 осуществляется через кольцевые камеры.



1 – основная диафрагма;
2 – дополнительная диафрагма
Рисунок 4.7 – Сдвоенная диафрагма

В случае измерения расхода загрязненных сред (загрязненная жидкость, запыленный газ) применя-

ются сегментные диафрагмы. Такие сужающие устройства не являются препятствием для прохода загрязняющих поток примесей и в них не образуются отложения вблизи диафрагмы.

Сегментная диафрагма представляет собой тонкий диск, имеющий отверстие в виде сегмента (рисунок 4.8), которое располагается в верхней части трубопровода, если необходимо измерять газовые и жидкие среды, загрязненные твердыми частицами, и в нижней части, если в жидкости находятся газовые пузырьки.

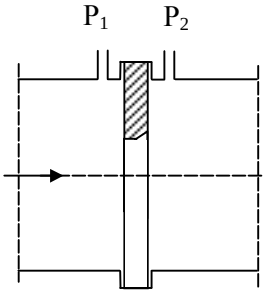


Рисунок 4.8 – Сегментная диафрагма

В обоих случаях примеси свободно проходят через отверстие и не образуют отложений и газовых пузырей (мешков) в месте расположения диафрагмы. Такие диафрагмы применяются для диаметров трубопровода больше 25 мм и при $Re \geq 2.5 \cdot 10^4$.

Опыт применения сужающих устройств для измерения расхода угольной пыли в смеси с воздухом на тепловых электростанциях показал, что наиболее рациональной конструкцией с точки зрения точности измерения, чувствительности и надежности работы в запыленных потоках является сопло с профилем "четверть круга" (рисунок 4.9). Такое сужающее устройство обеспечивает измерение отдельно расхода воздушного потока с погрешностью не превышающей ±2% и отдельно расхода угольной пыли с погрешностью ±2,5%.

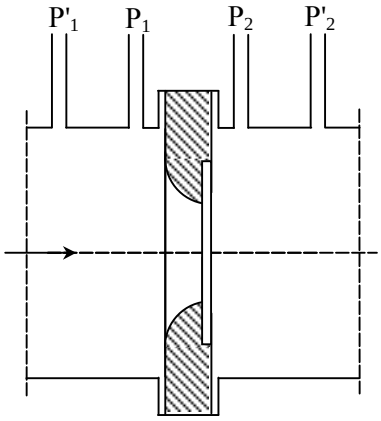


Рисунок 4.9 – Сопло с профилем в четверть круга для измерения расхода запыленных газовых потоков.

Аэродинамика потока в его профилирующей части обуславливает незначительный износ входных закруглений, радиус которых допускается уменьшить до 3%. В то же время полностью сохраняется чистота поверхности входной кромки, определяющей постоянство коэффициента расхода α.

Перепад давления, измеряемый в непосредственной близости

от сопла $\Delta P_1 = P_1 - P_2$, дает информацию о расходе воздуха, а по перепаду давления на расстоянии, равном половине диаметра трубопровода, $\Delta P_2 = P'_1 - P'_2$ определяют расход угольной пыли. Информация по давлениям P_1, P_2, P'_1, P'_2, преобразованная в электрические сигналы, поступает на микропроцессорное устройство, которое выдает данные по расходу воздуха, угольной пыли, а также по концентрации угольной пыли в 1 $м^3$ воздуха. В микропроцессор вводят также расчетные формулы, полученные экспериментально для данного сужающего устройства и конкретной движущейся среды.

Расходомеры с использованием сужающих устройств различных типов получили широкое применение из-за следующих их достоинств:

- простота конструкции и надежность получения первичной информации о расходе движущейся среды;
- универсальность метода, позволяющая измерять расход любых сред (жидких, газообразных, двухфазных) в широком диапазоне давлений, температур, расходов и диаметров трубопровода;
- градуировочная характеристика стандартных сужающих устройств может быть определена расчетным путем, поэтому отпадает необходимость в образцовых расходомерах;
- возможность использования для различных условий измерения однотипных вторичных приборов – расходомеров.

Однако, сужающие устройства имеют недостатки, основными из которых являются:

- необратимые потери давления, т.к. сужающие устройства являются местным аэродинамическим сопротивлением;
- нелинейная зависимость между расходом и перепадом, что позволяет измерять расходы, составляющие менее 30% от верхнего его значения;
- необходимость индивидуальной градуировки сужающих устройств при малых числах Re или в трубах $d<50$мм;
- относительно высокая погрешность измерения, составляющая от 1,5 до 3,0%;
- ограниченное быстродействие из-за конечной и недостаточной скорости прохождения сигнала от сужающего устройства к регистрирующему расходомеру (включая инерционность и самого расходомера), что создает трудности при измерении быстроменяющихся расходов.

4.3 Схемы соединительных линий при использовании сужающих устройств

Точность измерения расхода сужающими устройствами зависит не только от типа сужающего устройства и расходомера (дифманометра), но и от способа соединения этих двух приборов.

Передача импульсов давления от сужающего устройства к дифманометру осуществляется разными способами. На выбор схемы соединения оказывают влияние такие факторы, как параметры и физические свойства измеряемой среды, ее агрегатное состояние, взаимное расположение сужающего устройства и дифманометра.

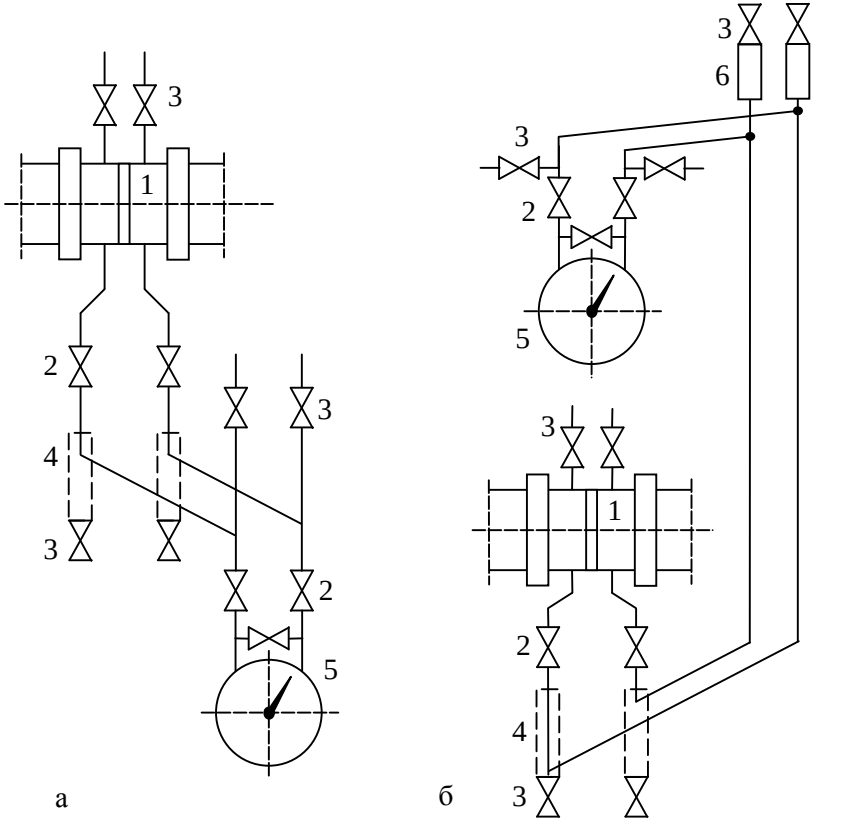
Дифманометр подключается к сужающему устройству двумя соединительными линиями (двумя импульсными трубками) внутренним диаметром не менее 8 мм и длиной не более 15 м. При измерении расхода неагрессивной жидкости дифманометр рекомендуется по возможности устанавливать ниже сужающего устройства (рисунок 4.10а), что исключает попадание в соединительные линии и дифманометр газа, который может выделиться из протекающей жидкости. Для горизонтальных трубопроводов соединительные линии должны подключаться через запорные вентили 2 к нижней половине трубы, но не в самой нижней части во избежание попадания в линии газа или осадков из трубопровода.

Запорные вентили используются при ремонтных, профилактических, наладочных и других работах как соединительных линий, так и дифманометра для отсоединения или присоединения к трубопроводу отдельных элементов системы измерения расхода. Для предохранения дифманометра от загрязнений в низших точках горизонтального трубопровода устанавливаются отстойные сосуды 4.

В случае расположения дифманометра выше сужающего устройства (рисунок 4.10 б) в схеме предусмотрены газосборники 6, устанавливаемые в высших точках линии, и отстойники 4, применяемые только в случае выпадения осадков из измеряемой жидкости.

Для уменьшения возможности поступления пузырьков газа из жидкости, протекающей в трубопроводе, в соединительные линии при установке дифманометра выше сужающего устройства, соединительные трубки располагаются ниже трубопровода на 0,7 м.

При измерении расхода газа дифманометр рекомендуется устанавливать выше сужающего устройства, чтобы конденсат, образовавшийся в соединительных линиях, мог стекать в трубопровод (рисунок 4.11). При измерении расхода агрессивного газа в соединительные

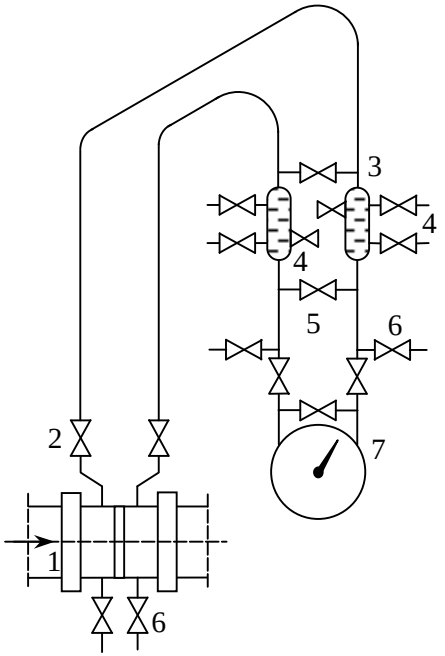


1 – сужающее устройство; 2 – запорный вентиль; 3 – продувочный вентиль; 4 – отстойный сосуд с продувочным вентилем; 5 – дифманометр (расходомер); 6 – газосборник с вентилем для продувки.

Рисунок 4.10 – Схемы соединительных линий при измерении расхода жидкости с расположением дифманометра ниже (а) и выше (б) сужающего устройства

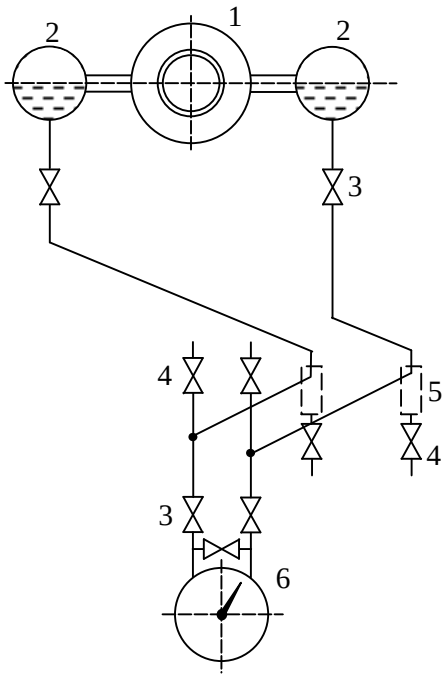
линии должны включаться разделительные сосуды. Они представляют собой емкости, заполненные нейтральной (разделительной) жидкостью (например, этиленгликоль, глицерин и др.)и располагаются между сужающим устройством и дифманометром.

Особенностью измерения расхода пара является необходимость соблюдения постоянства и равенства уровней конденсата в обеих соединительных линиях, а также предохранение от попадания и удаления попавшего в них воздуха. Схема соединения дифманометра с сужающим устройством при измерении расхода пара показана на рисунке 4.12. Обязательным элементом этого соединения является наличие



1 – сужающее устройство; 2 – запорный вентиль; 3 – разделительный сосуд; 4 – контрольный вентиль; 5 –вспомогательный вентиль; 6 – продувочный вентиль; 7 – дифманометр.

Рисунок 4.11 – Схема соединительных линий с разделительными сосудами при измерении расхода газа



1 – сужающее устройство; 2 – уравнительные сосуды; 3 – запорный вентиль; 4 –продувочный вентиль; 5 – отстойный сосуд; 6 – дифманометр.

Рисунок 4.12 – Схема соединительных линий при измерении расхода пара с установкой дифманометра ниже сужающего устройства

уравнительных сосудов 5 (конденсационных), наполовину заполненных конденсатом.

Все соединительные линии и дифманометр 8 также заполнены конденсатом. Уравнительные сосуды обеспечивают постоянство и одинаковость верхних уровней конденсата в обеих соединительных линиях. При измерении расхода пара дифманометр рекомендуется располагать ниже сужающего устройства и ниже уравнительных сосудов. Такой способ взаимного расположения сужающего устройства и дифманометра облегчает удаление воздуха из соединительных линий.

4.4 Измерение расхода жидкостей и газов напорными трубками

Напорные трубки (трубки Пито-Прандтля) применяют для измерения скорости потока жидкой или газообразной среды в трубопроводах, а также в открытых или закрытых каналах. При известной площади сечения потока (трубопровода) F и измеренной при помощи напорной трубки средней скорости потока $\overline{w}$ по всему сечению можно рассчитать расход данной среды по формуле:

$$V = \overline{w} \cdot F \qquad (4.19)$$

Измерение скорости потока напорными трубками производится по измерению динамического давления (скоростного напора) $P_д$, которое согласно уравнению Бернулли равно:

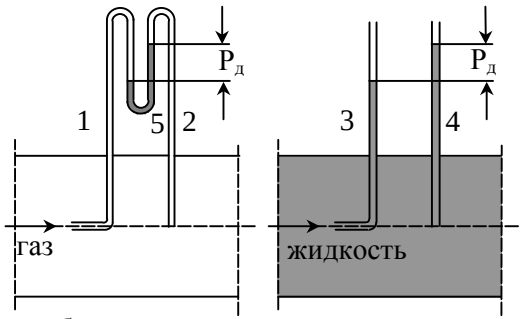
$$P_д = \frac{w^2 \rho}{2} \qquad (4.20)$$

где w – скорость потока в точке измерения, м/с;

ρ - плотность движущейся среды в рабочих условиях, кг/м^3;

$P_д$ – динамическое давление, создаваемое потоком, Па.

Метод измерения динамического давления, впервые примененный французским инженером и ученым Генри Пито в 1732 году для измерения скорости воды в реках и каналах, показан на рисунке 4.13. Трубка 1, установленная открытым концом навстречу потоку, воспринимает полный напор $P_п$, который складывается из суммы статического $P_{ст}$ и динамического $P_д$ давлений. Для определения только динамического давления необходимо от полного давления вычесть статическое давление. Для этого в поток помещается вторая трубка 2 так, что плоскость открытого конца располагается параллельно линиям тока (параллельно стенкам для трубопровода), и трубка 2 воспринимает только статическое давление. Дифманометр 5, подключаемый к наружным концам трубок, из-



1 – трубка полного давления;
2 – трубка статического давления;
3 – пьезометр полного давления;
4 – пьезометр статического давления;
5 – дифманометр

Рисунок 4.13 – Схема измерения динамического давления для газообразных и жидких сред

меряет разность полного и статического давлений, т.е. динамическое давление, по результатам которого рассчитывается скорость потока.

Для измерения скорости жидкой среды более удобно применять стеклянные трубки, свободные концы которых сообщаются с атмосферой. Высота подъема жидкости в пьезометре 3 определяет полное давление движущейся жидкости, а пьезометр 4 покажет статическое давление. Разность высот подъема жидкости в обеих трубках определяет динамическое давление.

При определении расхода по формуле (4.19) необходимо знать среднюю скорость потока в поперечном сечении трубопровода (канала). Средняя скорость зависит от режима движения среды. При ламинарном режиме средняя скорость равна половине скорости на оси трубы, т.е:

$$\overline{w} = 0{,}5 w_{ось}. \qquad (4.21)$$

Для ламинарного режима достаточно измерить динамическое давление на оси потока и рассчитать расход, используя формулы (4.19), (4.20), т.е.:

$$V = 0{,}5F\sqrt{\frac{2P_д}{\rho}}. \qquad (4.22)$$

При турбулентном режиме распределение скоростей по сечению потока (эпюра скоростей) более равномерное и зависит от числа Re. Среднюю скорость потока можно выразить через скорость на оси с учетом коэффициента, определяемого по экспериментальным данным:

$$\overline{w} = A w_{ось}. \qquad (4.23)$$

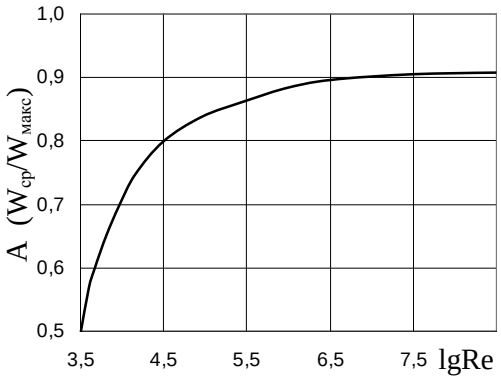


Рисунок 4.14 – Зависимость относительной средней скорости А ($W_{ср}/W_{макс}$) от числа Рейнольдса

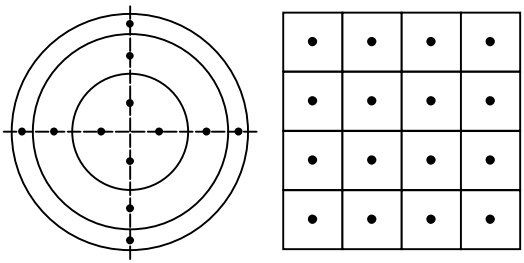
На рисунке 4.14 показана зависимость коэффициента А от числа Рейнольдса, полученная опытным путем для газообразных и жидких сред. При определении расхода в случае турбулентного режима производят следующие измерительные и вычислительные операции:

- измеряют напорной трубкой динамическое давление $P_д$ на оси;

- вычисляют скорость потока на оси $w_{ось}$;
- вычисляют число Рейнольдса по формуле $Re = \frac{w_{ось} D}{\nu}$, зная диаметр трубопровода D и коэффициент динамической вязкости ν для данной среды при рабочих условиях;
- по графику (рисунок 4.14) находят коэффициент A;
- вычисляют расход по формуле:

$$V = AF\sqrt{\frac{2P_д}{\rho}}, \text{ м}^3/\text{с} \qquad (4.24)$$

Наиболее сложные условия возникают при измерении расхода в сечениях трубопроводов или каналов с неустановившемся режимом движения среды. Такой режим возникает возле местных аэродинамических сопротивлений таких, как повороты трубопровода, задвижки, расширение, сужение и др. Для таких случаев применяется более точный, не зависящий от характера режима движения и формы сечения трубопровода, метод интегрирования. Для определения расхода все сечение трубопровода F разбивается на ряд участков "n" с равновеликими площадями $f_1=f_2=f_3=\ldots f_i$, при этом измеряется динамическое давление $P_{дi}$ в определенной точке каждого равновеликого участка и рассчитывается скорость w_i на каждом из них. Для цилиндрического трубопровода таких участков должно быть не менее 5 и измерение динамического давления ведется на каждом кольцевом участке в 4 диаметрально противоположных точках (рисунок 4.15 а). Прямоугольные каналы разбиваются на большее количество равновеликих площадей, не менее 16, и динамическое давление измеряется в середине каждого участка (рисунок 4.15 б). Объемный расход определяется по формуле:



а б

Рисунок 4.15 – Схема разбиения поперечного сечения канала круглого (а) и прямоугольного (б) сечения на ряд равновеликих площадей

$$V = F\sqrt{\frac{2}{\rho}\overline{P}_д}, \qquad (4.25)$$

где $\overline{P}_д$ - среднее значение динамического давления по всему сечению трубопровода, равное:

$$\sqrt{\overline{P_д}} = \frac{1}{n}\sqrt{P_{д1} + P_{д2} + ...P_{дi}} \qquad (4.26)$$

где n – число равновеликих площадей.

Используя выражение (4.25), получим формулу для определения расхода при неустановившемся режиме:

$$V = \frac{F}{n}\sqrt{\frac{2}{\rho}(P_{д1} + P_{д2} + ...P_{дi})}\ . \qquad (4.27)$$

В настоящее время применяется несколько конструктивных вариантов напорных трубок, приспособленных как для лабораторных, так и для промышленных измерений расхода или скорости жидких и газообразных сред. Наибольшее распространение получили нормализованные напорные трубки с полусферическим наконечником (рисунок 4.16). Полный напор воспринимается центральным отверстием в головке, направленным навстречу потоку, а статическое давление - через ряд отверстий, расположенных по окружности на боковой поверхности корпуса трубки 2. Давления из точек измерения отбираются с помощью тонких трубочек 3 и 4 и выводятся внутри корпуса держателя к соединительным штуцерам 5. Достоинством трубки с полусферической головкой является ее малая чувствительность к направлению набегающего потока. Отклонение трубки от оси потока на угол до 16° практически не сказывается на результатах измерения, так как полное и статическое давление изменяются одинаково.

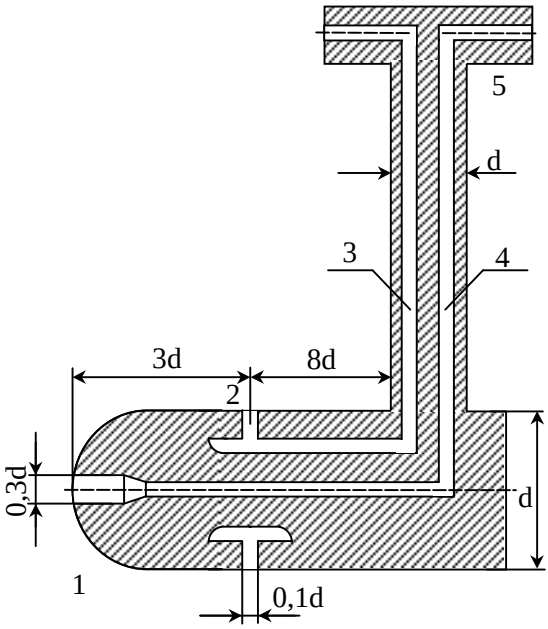


Рисунок 4.16 – Нормализованная напорная трубка

При измерении расхода (скорости) нормализованными напорными трубками возникает погрешность, обусловленная неточностью изготовления самой трубки, а также искажением поля скоростей из-за наличия

в потоке конструктивных элементов трубки. Поэтому в окончательные формулы, приведеные выше для всех режимов движения потока, вводится поправочный коэффициент "ε", определяемый градуировкой. Этот коэффициент для чисел Рейнольдса Re>700 близок к единице и составляет 0,98- 0,99, а для Re<700 (в зависимости от величины Рейнольдса) находится в интервале 0,94–0,98.

С учетом поправочного коэффициента, который называется коэффициентом напорной трубки, можно использовать следующие формулы для определения расхода напорными трубками:

- для ламинарного и турбулентного режимов при установке трубки на оси трубопровода

$$V = \xi A F \sqrt{\frac{2P_{д(ось)}}{\rho}}, \text{ где } A=f(Re),\ A=0{,}5 - 1{,}0 \qquad (4.28)$$

- для неустановившегося режима

$$V = \xi \frac{F}{n} \sqrt{\frac{2}{\rho} \sum_{i=1}^{n} P_{дi}}, \ м^3/с \qquad (4.29)$$

Напорные трубки для измерения расхода различных сред получили распространение в промышленности, особенно в тех случаях, когда другие методы неэффективны. Так, например, в теплоэнергетике на котлах большой мощности для измерения расхода среды в экранных трубах при проведении теплогидравлических испытаний получила распространение напорная трубка конструкции ВТИ (рисунок 4.17). Трубка имеет два скошенных отверстия, одно из которых воспринимает полное давление $P_п$, другое – статическое $P_{ст}$. Такие трубки удобны для измерения расхода среды в трубах поверхностей нагрева котлов (диаметр труб составляет 20 – 30 мм), благодаря простоте конструкции и малому гидравлическому сопротивлению. Для увеличения точности измерения производится предварительная тарировка каждого участка трубы с установленной в ней напорной трубкой.

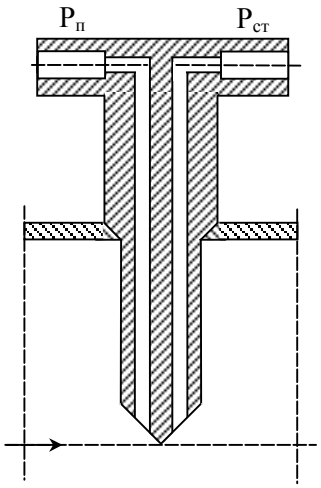


Рисунок 4.17 – Напорная трубка для измерения расхода в трубах малого диаметра

При наладке и испытании паровых котлов возникает необходимость в

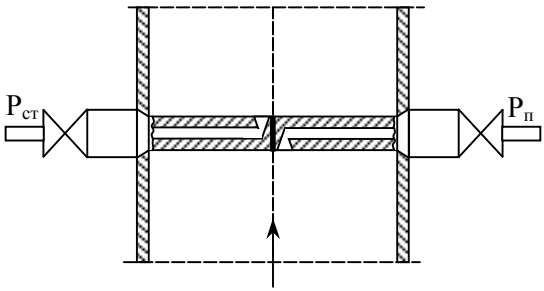


Рисунок 4.18 – Напорная трубка для измерения расхода сред в трубах большого диаметра

измерении расхода среды в трубопроводе большого диаметра, в котором не предусмотрена установка диафрагмы или сопла для эксплуатационных целей. В этом случае для измерения расхода используются расходомерные трубки конструкции ВТИ, простота которых позволяет изготавливать их в производственных условиях непосредственно на электростанциях. Напорная трубка (рисунок 4.18) изготавливается из двух отрезков труб малого по сравнению с трубопроводом диаметра. Эти отрезки сварены между собой по перегородке, разделяющей их внутренние полости.

Расходомерная трубка устанавливается по диаметру трубопровода, а заборные отверстия в ней диаметром 3 мм выполнены одно – по направлению, а другое – против направления потока по обе стороны от продольной оси трубопровода.

4.5 Ультразвуковые расходомеры

Рассмотренные выше методы измерения расхода имеют существенный недостаток, связанный с тем, что чувствительные элементы (диафрагма, сопло, напорная трубка) находятся в движущемся потоке и испытывают вредное воздействие среды на конструктивные части чувствительного элемента. С другой стороны, сами чувствительные элементы, находясь в потоке, искажают его аэродинамические характеристики, что приводит к появлению дополнительной погрешности измерения.

В последнее время начали широко применяться методы измерения расхода , в которых чувствительные элементы находятся вне движущейся среды, что позволяет расширить количество видов измеряемых сред (расплавленные металлы, кислоты, щелочи, агрессивные и токсичные жидкости и газы и др.). В одном из таких методов измерения расхода используется ультразвуковая волна, которая дает инфор-

мацию о скорости, а значит, о расходе движущейся среды в закрытых и открытых каналах.

В ультразвуковых расходомерах используются различные эффекты, связанные с прохождением ультразвука через движущуюся среду: изменение скорости ультразвука в продольном направлении потока; отклонение ультразвуковой волны при поперечном распространении в потоке; эффект Доплера и др.

Наибольшее распространение получил метод измерения расхода, основанный на измерении разности времен прохождения ультразвука по направлению и против направления течения среды. На рисунке 4.19 показана схема двухканального ультразвукового расходомера, в котором используется частотный способ измерения временных интервалов при прохождении ультразвука в двух направлениях: в направлении потока и против. Ультразвуковые волны, образованные двумя излучателями ($И_1$, $И_2$), проходят сечение канала в двух направлениях и поступают на два приемника, которые преобразуют ультразвуковые сигналы в электрические. В качестве излучателей используются пьезокристаллы, которые возбуждаются высокочастотными электрическими сигналами от генераторов $Г_1$ и $Г_2$.

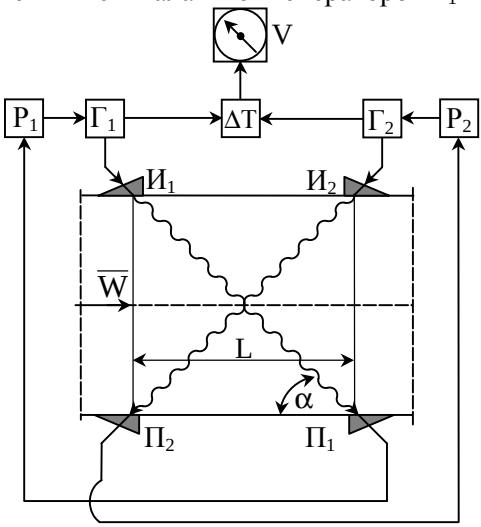


Рисунок 4.19 – Схема частотного ультразвукового расходомера

Приемники $П_1$ и $П_2$ посылают электрические сигналы на соответствующие реле $Р_1$ и $Р_2$, которые управляют работой генераторов $Г_1$ и $Г_2$ в режиме "включено - выключено". При поступлении сигнала на реле происходит отключение генератора, а при отсутствие сигнала – включение. Таким образом, генераторы $Г_1$ и $Г_2$ работают в периодическом режиме, а время работы и "молчания" равно времени прохождения ультразвуковых сигналов через движущуюся среду. Измерение времени работы генераторов (времени прохождения ультразвука через трубопровод) производится во временном блоке ΔТ.

Время прохождения ультразвука по ходу и против хода потока определяется по формулам:

по ходу $$T_1 = \frac{L}{c \cdot \cos\alpha + \overline{w}} \quad (4.30)$$

против хода $$T_2 = \frac{L}{c \cdot \cos\alpha - \overline{w}} \quad (4.31)$$

Для исключения из этих формул скорости ультразвука "с", которая зависит от физико-химических свойств среды (температуры, давления, плотности, химсостава и др.) и влияет на точность измерения расхода, блок времени измеряет не разность времен T_1 - T_2, а разность обратных времен, т.е. разность частот следования этих сигналов:

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} = \frac{c \cdot \cos\alpha + \overline{w} - c \cdot \cos\alpha + \overline{w}}{L} = \frac{2\overline{w}}{L}, \quad (4.32)$$

где $\frac{1}{T_1} = f_1$ – частота следования импульсов при прямом ходе ультразвука;

$\frac{1}{T_2} = f_2$ – частота следования импульсов при встречном ходе ультразвука.

Используя формулы (4.19) и (4.32), можно записать окончательное выражение для определения расхода среды при использовании частотного ультразвукового расходомера:

$$V = \frac{FL}{2}(f_1 - f_2), \text{ м}^3/\text{с} \quad (4.33)$$

где F – сечение трубопровода (канала), $м^2$.

Как видно из формулы (4.33), показания частотного расходомера не зависят от скорости распространения ультразвука в среде, что является важным достоинством такого метода измерения расхода жидких и газообразных сред.

В других типах расходомеров ультразвуковая волна направлена перпендикулярно оси трубы и по величине отклонения ультразвуковой волны от перпендикуляра определяется расход или средняя скорость потока. По мере увеличения средней скорости потока $\overline{w}$ ультразвуковой луч все более отклоняется по направлению скорости потока (рисунок 4.20). Угол отклонения луча α будет определяться

выражением:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{\overline{w}}{c}\right) \qquad (4.34)$$

Линейное отклонение луча у приемников (пьезоэлементов) $П_1$ и $П_2$ равно

$$\delta = D \cdot \operatorname{tg}\alpha \qquad (4.35)$$

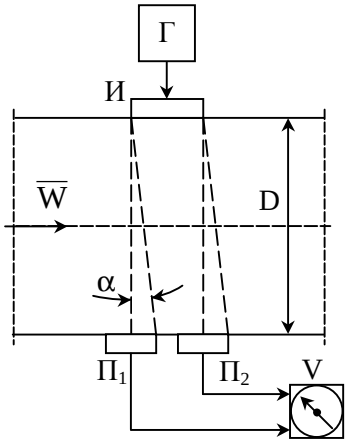


Рисунок 4.20 – Ультразвуковой расходомер по отклонению луча от вертикали

С увеличением средней скорости среды $\overline{w}$ количество энергии, поступающий на приемник $П_1$ уменьшается, а поступающей на приемник $П_2$ – увеличивается. Разностный сигнал от приемников $П_1$ и $П_2$ увеличивается с увеличением средней скорости, а значит и расхода, и поступает в расходомер V.

Расходомеры с такой схемой просты по устройству, но обладают ограниченной точностью из-за малого отклонения луча. Кроме того, скорость ультразвука, которая входит в расчетные формулы расхода, может меняться при изменении физических параметров и состава измеряемой среды, что вносит дополнительную погрешность.

Разработаны другие типы ультразвуковых расходомеров нового поколения, таких как время-импульсные и фазовые. Во время-импульсных расходомерах периодически производится измерение разности времен прохождения очень коротких импульсов длительностью 0,1 – 0,2 микросекунд, по ходу и против хода движения среды в трубопроводе. Измеряемая разность времен очень мала даже при больших скоростях движения среды, что требует применения электронных измерительных систем повышенной точности. Кроме того, показания таких расходомеров зависят от изменения скорости ультразвука в среде. Такие расходомеры применяются в основном для измерения расхода жидких сред, в которых в процессе измерения существенно не изменяются такие параметры как плотность, температура, давление.

В фазовых ультразвуковых расходомерах используется эффект

Доплера, т.е. измеряется разность фаз ультразвуковых колебаний, распространяющихся по потоку и против него. Недостатком таких расходомеров также является зависимость показаний от изменения скорости ультразвука в среде.

В настоящее время в Украине разработаны различные модификации ультразвуковых время-импульсных и доплеровских (фазовых) расходомеров, которые применяются в нефтяной, металлургической, химической и других отраслях промышленности для измерения расхода мазута, нефти, нефтепродуктов и других жидкостей, в том числе сред, загрязненных твердыми и газообразными включениями. Достоинством таких расходомеров является широкий диапазон измеряемых расходов от 0,45 до 110000 $м^3$/ч для трубопроводов диаметром от 40 до 1800 мм с погрешностью измерения не более 2 %.

Современные ультразвуковые расходомеры комплектуются встроенными микропроцессорами, которые обеспечивают обработку поступающей от датчиков информации, измерение и индикацию расхода среды (за час, сутки, месяц), выработку унифицированного токового сигнала при использовании системы автоматического регулирования, ввод необходимых корректирующих и управляющих команд и др.

На практике получили распространение и переносные ультразвуковые расходомеры, которые имеют такие же метрологические характеристики, как и стационарные. В комплект прибора входит непосредственно расходомер, портативная ЭВМ (notebook), многофункциональный блок питания со встроенным аккумулятором, монтажные приспособления для быстрого и правильного расположения датчиков на поверхности трубопровода. Такие приборы используются для оперативного контроля расхода выбранного типа среды на различных участках трубопроводов, имеющих различный диаметр и толщину стенки.

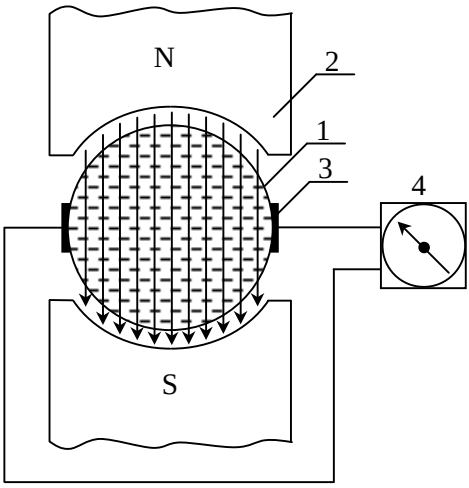
Ультразвуковые расходомеры являются наиболее перспективными приборами для измерения расхода различных жидких и газообразных сред, оснащенные многофункциональными малогабаритными микропроцессорными устройствами. Использование микропроцессора позволяет значительно повысить точность измерения за счет автоматического ввода корректирующих сигналов при изменении физических и химических свойств измеряемой и окружающей среды. Наибольшую точность измерения показывают одноканальные ультразвуковые расходомеры с врезными датчиками, погрешность которых не превышает 0,3 %.

4.6 Электромагнитные расходомеры

Измерение расхода электромагнитными расходомерами основано на принципе электромагнитной индукции. В соответствии с этим принципом при движении электропроводной жидкости в магнитном поле индуктируется ЭДС, величина которой пропорциональна скорости движения жидкости.

Электромагнитные расходомеры применяются для измерения в трубопроводах объемного расхода водопроводной воды, различных растворов (солей, щелочей, кислот), пульп, жидких металлов и других электропроводных жидкостей, электрическая проводимость которых должна быть не менее 10^{-3} Ом/м (соответствует электропроводности водопроводной воды). Измеряя ЭДС, наведенную в электропроводной жидкости, которая при своем движении пересекает магнитное поле, можно определить среднюю скорость текущей жидкости, а вместе с тем и объемный расход.

Измерение расхода жидкости электромагнитным методом осуществляется при использовании как постоянного магнита, так и магнита с переменным магнитным полем. Указанные способы создания магнитного поля имеют свои положительные и отрицательные стороны.



1 – часть изолированного трубопровода; 2 – постоянный магнит; 3 – электроды; 4 – измерительный прибор

Рисунок 4.21 – Схема электромагнитного расходомера с постоянным магнитным полем

Схема электромагнитного расходомера с постоянным магнитным полем изображена на рисунке 4.21. Корпус 1 – это отрезок трубы, выполненный из немагнитного материала и покрытый изнутри электрической изоляцией (резиной, эмалью, фторопластом и др.), расположен между полюсами магнита 2. Магнитные силовые линии направлены перпендикулярно вектору скорости движения жидкости. Через стенку трубы изолированно от нее введены электроды 3, находящиеся в контакте с жидкостью.

При протекании электропроводной жидкости между электродами будет наводиться ЭДС:

$$E = B \cdot D \cdot \overline{w} \qquad (4.36)$$

где B – индукция магнитного поля;

D – длина жидкостного проводника, равная диаметру трубы;

$\overline{w}$ - средняя скорость жидкости.

Учитывая, что $\overline{w} = \frac{V}{F} = \frac{4V}{\pi D^2}$, получаем:

$$E = 4B\frac{V}{\pi D} \qquad (4.37)$$

Из формулы (4.37) видно, что ЭДС прямо пропорциональна измеряемому объемному расходу. Измерение наведенной ЭДС осуществляется измерительным прибором 4, который градуируется в единицах массы или объема измеряемой жидкости.

Преимуществом электромагнитных расходомеров с постоянным магнитным полем является то, что значительно облегчается борьба с помехами от внешних переменных электромагнитных полей, особенно при применении в промышленных условиях, где работают электромоторы, магнитные краны, трансформаторы и другое электротехническое оборудование. К числу достоинств таких расходомеров следует отнести отсутствие необходимости в источнике питания чувствительных элементов, т.е. самих электродов, расположенных на трубопроводе, что обеспечивает безопасность его работы и ряд других факторов.

Основным недостатком магнитных расходомеров с постоянным магнитным полем является поляризация электродов, т.е. возникновение у положительного электрода отрицательных ионов, а у отрицательного электрода положительных ионов. По мере накопления этих зарядов у электродов (токосъемников) возникает ЭДС, направленная против основной измеряемой ЭДС, что приводит к нарушению градуировки прибора и стабильности его работы. Поэтому электромагнитные расходомеры с постоянным магнитным полем не применяются для жидкостей с ионной проводимостью (кислоты, щелочи, соли, водные растворы различных веществ и др.). Такие расходомеры получили применение для измерения расхода жидких сред с электронной проводимостью, к которым относятся расплавленные жидкие металлы (натрий, ртуть, железоуглеродистые расплавы и др.) и в которых отсутствует явление поляризации. Возможное применение таких расхо-

домеров – атомные реакторы с жидкометаллическим теплоносителем, плавильные и литейные агрегаты на металлургических заводах и др.

Для измерения расхода сред с ионной проводимостью применяются расходомеры с переменным магнитным полем, создаваемым электромагнитом (рисунок 4.22). При достаточно высокой частоте электромагнитного поля поляризация электродов практически отсутствует. Однако использование переменного магнитного поля имеет свои недостатки, одним из которых является появление паразитной трансформаторной ЭДС. Эта ЭДС наводится переменным магнитным полем в проводниках, находящихся в переменном магнитном поле и связывающих электроды-токосъемники с измерительным прибором.

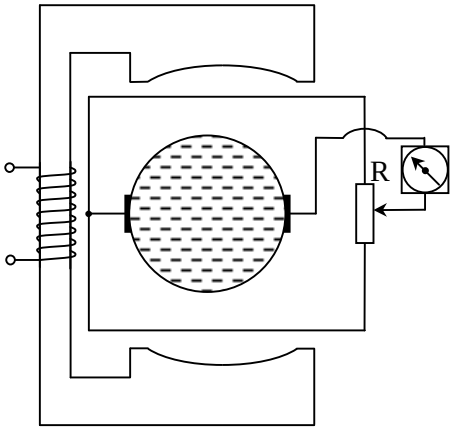


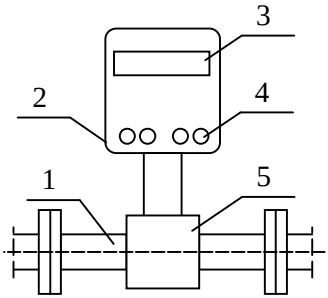
Рисунок 4.22 – Схема электромагнитного расходомера с переменным магнитным полем

Для компенсации трансформаторной ЭДС выводы одного из электродов соединяются симметрично расположенными проводами, замкнутыми на регулирующий резистор R, создавая кольцевую замкнутую цепь. При работе расходомера паразитная ЭДС, возникающая в верхнем проводе кольцевой цепи, равна ЭДС, которая возникает в нижнем проводе этой цепи. Так как возникающие в двух проводниках трансформаторные ЭДС имеют противоположные направления, то происходит компенсация паразитных ЭДС в этих проводниках. Однако полного устранения трансформаторной ЭДС не происходит из-за наличия в магнитном поле проводника, идущего от второго электрода. В современных электромагнитных расходомерах помимо указанного выше способа применяются фазочувствительные детекторы, которые пропускают только полезный сигнал (ЭДС, возникающую при движении жидкой среды в трубопроводе), и полностью компенсируют трансформаторную ЭДС.

Электромагнитные расходомеры различных модификаций, производимые в Украине, имеют встроенное в измерительный блок микропроцессорное устройство, которое обрабатывает информацию от датчика расхода, установленного на трубопроводе, регистрирует значение мгновенного расхода и количества за определенный промежу-

ток времени, имеет возможность передачи данных на ЭВМ по интерфейсу RS – 485 и другие операции.

На рисунке 4.23 показан один из вариантов электромагнитного расходомера, который исполнен в виде единого измерительно-вычислительного модуля, размещенного непосредственно на объекте измерения расхода – трубопроводе. Такой прибор может быть использован и как теплосчетчик при получении от микропроцессора информации о температуре среды в трубопроводе.



1 – участок трубопровода;
2 – вычислительный модуль;
3 – индикация показаний;
4 – кнопки управления;
5 – датчик расхода

Рисунок 4.23 – Портативный электромагнитный расходомер

Электромагнитные расходомеры, имеющие класс точности 0,5 – 1,0, применяются на трубопроводах практически любых диаметров без ограничения верхнего предела по расходу. Их показания не зависят от вязкости и плотности среды. Датчик расхода (чувствительный элемент), практически безинерционный, находится вне движущейся среды и, таким образом, не создает потери давления. Расходомеры, использующие такой принцип измерения, находят применение для измерения расхода агрессивных, абразивных и вязких жидкостей и пульп, жидких металлов, т.е. в тех случаях, когда применение расходомеров других типов затруднено.

4.7 Измерение расхода тепла в теплофикационных системах

Объективный контроль и анализ работы ТЭЦ, котельных, тепловых сетей, различных теплообменников и других тепловых систем и агрегатов можно осуществлять только путем непрерывного измерения расхода и количества отдаваемого потребителям тепла. Коллективные и индивидуальные потребители также заинтересованы иметь информацию о количестве потребленного тепла, имея соответствующие приборы для измерения расхода теплоносителя и его температуры.

Прибор, измеряющий расход тепла в единицу времени, называется тепломером. Прибор, измеряющий расход и количество теплоты за некоторый промежуток времени, называется теплосчетчиком.

Расход тепла Q, отпускаемый потребителю в единицу времени, выражается уравнением:

$$Q=V\cdot\rho\cdot c(t_1-t_2), \qquad (4.38)$$

где V – объемный расход воды (теплоносителя) в подающей линии, $м^3/с$;

c – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К);

t_1, t_2 – температуры прямой и обратной воды, °С;

ρ - плотность воды в прямой линии, $кг/м^3$.

Из формулы (4.38) видно, что для определения расхода тепла тепломер должен одновременно измерять объемный расход прямой сетевой воды и температуру прямой и обратной воды. При измерении расхода тепла по формуле (4.38) необходимо в измерительный прибор (в измерительную систему) вводить корректирующие множители, т.е. значения теплоемкости и плотности воды. Для уменьшения погрешности измерения расхода необходимо учитывать изменение плотности и теплоемкости воды от температуры самой воды. Изменение плотности и теплоемкости воды от температуры может быть учтено с помощью аппроксимирующих функций:

$$\rho = \rho_0 \frac{1}{K_1 + K_2 t} \qquad (4.39)$$

$$c=c_0+K_3\Delta t \qquad (4.40)$$

где ρ_0 и c_0 – плотность и теплоемкость воды при расчетной температуре (например, 20 °С);

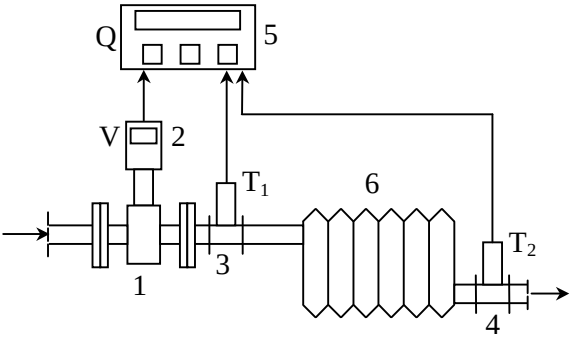
K_1, K_2, K_3 – постоянные коэффициенты, определяемые из табличных данных плотности и теплоемкости воды;

Δt – отклонение температуры от расчетной.

Для параметров воды в теплофикационных системах (давление до 1,0 МПа, t≤150°С) влиянием давления на плотность и теплоемкость можно пренебречь.

Приведенные уравнения показывают, что для измерения расхода требуются такие системы, которые могут реализовать все соотношения между параметрами, определяющими расход тепла.

Наиболее перспективными тепломерами, которые учитывают все параметры, входящие в формулы расхода тепловой энергии, являются измерительные комплексы или отдельные приборы с широким применением микропроцессорных устройств. На рисунке 4.24 приведена одна из возможных схем учета расхода тепла на отопление. Расход воды осуществляется ультразвуковым расходомером, со встроенным микропроцессором 2 для обработки информации от датчика расхода 1



1 – датчик ультразвукового расходомера; 2 – расходомер; 3 – датчик температуры прямой воды; 4 – датчик температуры обратной воды; 5 – тепломер; 6 – теплообменник (потребитель тепла)

Рисунок 2.24 – Схема измерения расхода тепла на отопление

с индикацией часового расхода, а также за определенный промежуток времени. Температура воды измеряется на входе и выходе из теплообменника 6 двумя платиновыми термопарами сопротивления 3 и 4.

Информация о расходе V и температуре T_1 и T_2 поступает в центральный микропроцессор, который выполняет следующие функции:

- коррекцию изменения плотности и теплоемкости воды в зависимости от температуры воды на входе в теплообменник;
- измерение и индикацию тепловой мощности теплообменника, кВт;
- помесячную регистрацию расхода тепла, кДж;
- суточную регистрацию расхода тепла, кДж;
- установку и расчет тепловой энергии по тарифам;
- индикацию температуры теплоносителя (воды) на входе и разность температур на входе и выходе теплоносителя;
- архивацию всех измеренных и рассчитанных параметров теплоносителя, в том числе среднечасовой, суточный, месячный и годовой расход тепла.

Большинство выпускаемых и эксплуатируемых тепломеров имеют такие характеристики:

- питание всех систем, в том числе и датчиков расхода и температуры, от литиевой батарейки со сроком работы до 6 лет;
- диапазон измерения температуры от 5 до 150 °С;
- относительная погрешность измерения расхода тепла ±4%;
- диаметр трубопровода тепловой сети 15 – 250 мм;
- длина линий связи между преобразователями (датчиками) расхода, температуры и тепломером до 25 м;
- связь с внешними устройствами через RS - 232; M – BUS, модем;

– средний срок службы 12 лет.

Аналогичные системы разработаны для учета расхода тепла в системах горячего водоснабжения.

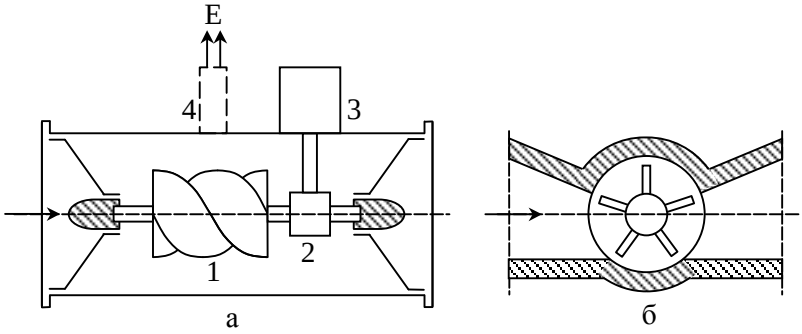
4.8 Тахометрические расходомеры

В тахометрическом методе используется зависимость скорости движения чувствительного элемента, помещенного в измеряемую среду, от расхода этой среды. Тахометрический метод нашел применение для измерения холодной и горячей воды, кислот, щелочей, жидких продуктов нефтеперегонки, газов и других веществ, химически не действующих на чувствительный элемент расходомера.

По принципу действия выпускаемые тахометрические расходомеры разделяются на скоростные и объемные. Скоростные расходомеры (счетчики) применяются главным образом для измерения суммарного количества холодной и горячей воды. В скоростных счетчиках в качестве чувствительного (рабочего) элемента применяются вертикальные и горизонтальные вертушки (турбинки). У счетчиков с вертикальной вертушкой поток жидкости, вращающий вертушку, направлен по касательной к окружности, описываемой средним радиусов вертушки. Такие крыльчатые вертушки обычно называются тангенциальными, и они применяются для измерения небольших расходов (от 0,15 до 12,6 $м^3$/ч). У счетчиков с горизонтальной вертушкой поток жидкости направлен параллельно оси вертушки и такие приборы называются аксиальными . Число оборотов вертушки прибора суммируется счетным механизмом с указанием количества жидкости в единицах объема.

На рисунке (4.25 а,б) показаны схемы устройства некоторых типов расходомеров с аксиальной (а) и тангенциальной турбинкой. Корпус прибора (рисунок 4.25, а) представляет собой отрезок трубы с двумя фланцами для присоединения его к трубопроводу. Внутри корпуса расположена турбинка 1. Частота вращения турбинки, пропорциональная объемному расходу, с помощью редуктора 2 передается либо на счетное механическое устройство 3, либо на электрический преобразователь 4, который выдает электрический сигнал Е, пропорциональный объемному расходу жидкой среды, протекающей через трубопровод.

Турбинные тахометрические расходомеры отличаются большой точностью (погрешность 0,5%), широким диапазоном измеряемых расходов от $0{,}2 \cdot 10^{-2}$ $м^3$/ч до 7500 $м^3$/ч при давлениях до 250 МПа и



а – расходомер с аксиальной турбинкой; б – расходомер с тангенциальной турбинкой
1 – турбинка; 2 – передаточный механизм; 3 – счетное устройство; 4 – электрический преобразователь
Рисунок 4.25 – Устройство турбинных расходомеров

температуры от –240 °С до +700 °С. Они устанавливаются на трубопроводах диаметром 4 – 750 мм.

Тахометрические турбинные расходомеры имеют и недостатки, ограничивающие их применение: влияние вязкости измеряемой среды, износ опор при наличии твердых частиц в жидкой среде.

Объемные тахометрические счетчики, обладающие более высокой точностью по сравнению со скоростными, применяются для измерения суммарного количества мазута, нефти, бензина и других жидкостей, а также различных газовых сред. В объемных счетчиках протекающая через нее жидкость (газ) измеряется отдельными, равными по объему дозами, отсекаемыми одним или несколькими рабочими элементами. Число пропущенных доз жидкости (газа), суммируется счетным механизмом.

В промышленности в большинстве случаев применяются камерные счетчики, имеющие высокую точность измерения (0,5 – 1% для жидкости и 1 – 1,5 % для газов) и позволяющие применять их для жидкостей с высокой вязкостью. Одним из приборов камерного типа является ротационный счетчик, применяемый для измерения объемного расхода очищенных неагрессивных горючих газов (природного, пропанабутана, доменного, генераторного, коксового и др.). Счетчики позволяют измерять расходы в пределах от 40 до 40000 $м^3$/ч с погрешностью менее 2,5% при давлениях до 6,4 МПа и температуре –50…+50°С.

На рисунке 4.26 показана схема работы ротационного расходомера (счетчика). В корпусе счетчика размещены два поршня-ротора,

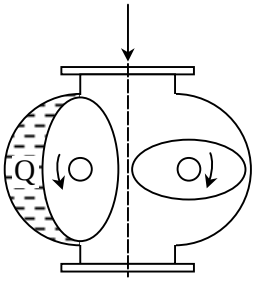
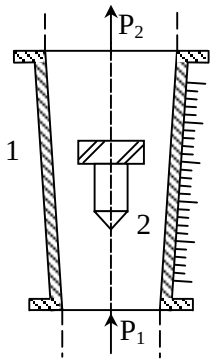


Рисунок 4.26 – Ротационный расходомер

имеющие овальную форму, а также передаточный механизм и счетное устройство. Газ поступает через верхний патрубок в корпус прибора, вращает роторы и выходит через нижний патрубок. За один оборот пропускается четыре объема Q (показанный штриховкой), т.е. по два объема на каждый ротор. Конец одного из валов связан с редуктором и счетным механизмом. Расход газа, пропорциональный числу оборотов ротора, отмечается на счетном механизме прибора.

В промышленной и лабораторной практике для измерения небольших объемных расходов жидкостей (от 0,04 до 16 $м^3$/ч) и газов (от 0,063 до 40 $м^3$/ч) получили распространение расходомеры постоянного перепада, больше известные как ротаметры.

Ротаметр представляет собой вертикальную коническую (расходящуюся вверх) стеклянную трубку 1, внутри которой располагается поплавок 2 (рисунок 4.27), выполненный в зависимости от пределов измерения из различных материалов (стали, эбонита, алюминия, фторопласта). Центрирование положения поплавка внутри конической трубки достигается применением специальной винтовой насечки на ободе поплавка. Под действием движущегося потока поплавок перемещается в вертикальном направлении и одновременно вращается вокруг своей оси, что и обеспечивает его центрирование в середине потока.



1 – корпус;
2 – поплавок;
Рисунок 4.27 – Схема ротаметра

Объемный расход среды, протекающей через ротаметр, определяется по перемещению поплавка вдоль шкалы, нанесенной на боковой поверхности корпуса ротаметра.

Принцип действия ротаметра основан на уравновешивании при любом расходе силы тяжести самого поплавка другими силами, действующими на него со стороны жидкости.

Снизу на поплавок действуют следующие силы:

- сила, обусловленная разностью статических давлений P_1–P_2, равная $P_{ст}=(P_1–P_2)\cdot F$, где F – площадь сечения поплавка;

- динамическое давление со стороны набегающей на поплавок движущейся среды

$$P_д = \frac{w^2 \cdot \rho}{2},$$

где w – скорость потока перед поплавком, м/с;

- сила трения потока о боковую поверхность поплавка $P_{тр}=к \cdot W_к \cdot F_б$, где к – коэффициент, зависящий от шероховатости поплавка; $W_к$ – средняя скорость потока в кольцевом зазоре между корпусом и поплавком; $F_б$ – площадь боковой поверхности поплавка.

Поплавок будет неподвижно висеть в потоке жидкости или газа, если будет соблюдаться равенство сил, действующих на него сверху и снизу:

$$G=(P_1–P_2)\cdot F+P_д+P_{тр} \quad (4.41)$$

Если пренебречь силами $P_д$ и $P_{тр}$, то можно записать

$$P_1 - P_2 = \frac{G}{F} \quad (4.42)$$

т.е. перепад давления на поплавке не зависит от расхода, поэтому ротаметры называются еще расходомерами постоянного перепада, что видно из формулы (4.42), где отношение веса поплавка G к его поперечному сечению F есть величина постоянная (G/F=const). При увеличении расхода увеличивается площадь кольцевого зазора, что будет соответствовать новому положению поплавка.

Формула расхода для ротаметров выражается сложной зависимостью, определяемой большим количеством параметров:

$$Q = \alpha \cdot F \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot V_п \cdot (\rho_п - \rho)}{\rho \cdot F}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (4.43)$$

где α - коэффициент расхода, зависящий от конусности корпуса прибора, потерь на местные сопротивления и трение при движении среды в ротаметре, геометрической формы поплавка и ряда других параметров;

$V_п$ – объем поплавка, $м^3$;

$\rho_п$ и ρ - плотность материала поплавка и протекающей среды, $кг/м^3$.

Так как коэффициент расхода α аналитически определить невозможно, то на практике ротаметры градуируются экспериментально по воде или воздуху, а соответствующие градуировочные характеристики приводятся в паспорте прибора.

Если в процессе измерения изменяется плотность среды (из-за изменения давления или температуры) или измеряется другой тип среды (вместо воздуха или воды измеряются другие газы или другие жидкие среды), то показание ротаметра нужно умножить на поправочный множитель "к", определяемый по формуле:

$$к = \sqrt{\frac{\rho_{гр} \cdot (\rho_{п} - \rho)}{\rho \cdot (\rho_{п} - \rho_{гр})}} \qquad (4.44)$$

где $\rho_{гр}$ и ρ – градуировочная и действительная плотность среды.

Погрешность измерения расхода ротаметром может быть определена через погрешность величин, входящих в формулу (4.43). Наибольшее влияние на погрешность оказывает изменение коэффициент расхода α, а также неточность определения плотности среды, отличие массы поплавка от расчетного значения и другие. Обычный класс точности ротаметров составляет 2,5, однако, погрешность измерения может быть уменьшена в 2-3 раза индивидуальной градуировкой с использованием образцовых расходомеров.

Недостатками ротаметров являются: необходимость установки только на вертикальных участках трубопроводов, трудности дистанционной передачи показаний и записи, невозможность применения для сред с высоким давлением и температурой.

4.9 Тенденции развития средств измерения расхода

В настоящее время выпускается более 100 различных типов расходомеров, многие из которых используются только в лабораторной практике и непригодны для промышленного применения. Все производимые промышленностью расходомеры можно разделить на две основные категории: расходомеры, действие которых основано на извлечении энергии из измеряемой среды, и расходомеры, действие которых основано на передаче энергии измеряемой среде. Большинство применяемых расходомеров основано на извлечении энергии из движущейся в трубопроводе жидкой или газовой среды, что сопровождается нежелательным явлением – необратимой потерей давления измеряемой среды. Для другой группы расходомеров, в которых энергия сообщается среде, потеря давления в измеряемой среде практически отсутствует.

Извлечение энергии из измеряемого потока, связанное с сужением канала, может происходить в различных типах приборов путем

уменьшения сечения канала, помещения в поток ротора или тела необтекаемой формы. Все элементы и устройства, создающие разность давлений, имеют квадратичную зависимость выходного сигнала от значения расхода, что ограничивает их рабочий диапазон. Так, например, измерение расхода в соотношении 5:1 соответствует изменению разности давлений в отношении 25:1. Так как рабочий диапазон измерительных преобразователей разности давлений ограничен, это существенно снижает диапазон измерения расхода. Анализ показывает, что, несмотря на недостатки, приборы, основанные на принципе сужения потока пока занимают лидирующее положение в промышленности, однако, наблюдается тенденция к уменьшению их доли. Дальнейшее производство и эксплуатация расходомеров такого типа будет связана с усовершенствованием преобразователей на базе использования микропроцессорной техники, повышающей точность измерения в несколько раз.

При измерении массового расхода (кг/ч, кг/с) расходомерами любых типов разработаны средства преобразования, выходной сигнал которых является прямой функцией только массового расхода, т.е. температура, давление и свойства жидкости или газа не влияют на выходной сигнал. В таких расходомерах применяется микропроцессорное устройство, в котором производится обработка поступающей информации от других чувствительных элементов и вносится поправка в значение массового расхода на температуру, давление и состав измеряемой среды. Расходомеры для измерения массового расхода, в которых автоматически вводится коррекция на изменение параметров среды, особенно эффективны для измерения расхода газообразного топлива (природного, коксового, доменного, генераторного и др.). В процессе измерения температура, давление и состав газа могут меняться в широких пределах, что может существенно влиять на технологический процесс, если не производить соответствующие поправки.

Альтернативой измерительным приборам с сужающими устройствами предлагаются вихревые расходомеры для измерения расхода жидких сред и особенно пара. В таких приборах в движущийся поток помещается тело необтекаемой формы (прямоугольной, треугольной, Т-образной), возле которых образуются вихри. Частота следования вихрей зависит от скорости, а значит от расхода среды в трубопроводе. Существует несколько методов обнаружения этих вихрей. Наиболее часто в качестве чувствительного элемента в вихревых расходомерах применяется термистор, который преобразует динамическое воздействие при пульсации вихрей в частотный электрический сигнал.

Обработка сигнала осуществляется в предусилителе и полосовом фильтре, а затем в микропроцессоре, который выдает информацию о расходе (объемном или массовом) движущейся в трубопроводе среды.

На основе развития микроэлектроники усовершенствованы тепловые расходомеры (например, термоанемометры). Терморасходомеры основаны на двух основных принципах. В первом случае нагретое тело соприкасается с потоком жидкости и охлаждающее действие жидкости (степень охлаждения нагретого тела в потоке среды) является мерой скорости (расхода). Во втором случае теплота от нагретого тела передается потоку жидкости, текущей в закрытом канале, а количество передаваемой теплоты и увеличение (уменьшение) температуры потока определяет массовый расход жидкой среды.

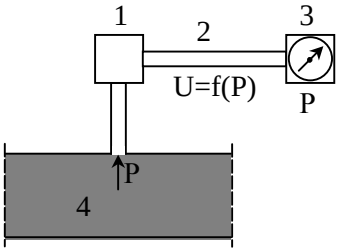
К расходомерам первого типа относятся термоанемометры с нагретой нитью или пленкой для локального измерения скорости потока. Ко второму типу относятся устройства для определения полного массового расхода. Термоанемометры с нагретой пленкой отличаются стабильной характеристикой и прочностью, однако, им свойственна заметная инерционность. Наиболее перспективными приборами такого типа можно считать многоканальные термоанемометры, предназначенные для измерения составляющих скорости двух или трех направлений. Они могут быть использованы как в лабораторной, так и в промышленной практике для определения аэродинамических характеристик потоков жидкой или газовой среды в измеряемых объектах (трубопроводах, рабочем пространстве технологических установок и др).

Анализ развития средств измерения расхода показывает, что совершенствование расходомеров будет идти по пути разработки чувствительных элементов, располагаемых вне трубопроводов без нарушения их целостности и с широким применением микропроцессорных устройств.

5 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ

5.1 Общие сведения

Большинство современных систем измерения давления (перепада давления) жидких и газообразных сред в технологических агрегатах состоят из первичного преобразователя, вторичного прибора и соединяющей их линии связи (рисунок 5.1).



1 – первичный преобразователь; 2 – линия связи; 3 – вторичный прибор; 4 - объект

Рисунок 5.1 – Схема системы измерения давления

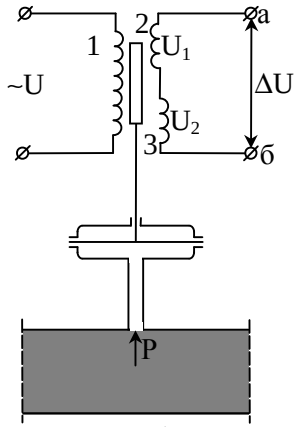
Первичный преобразователь 1 располагается около места измерения (около объекта) 4 и предназначен для преобразования измеряемого давления P в электрический (пневматический) сигнал U, удобный для передачи по линии связи 2 к вторичному прибору 3, устанавливаемому на щите управления. Чаще всего при измерении давления с использованием преобразователя применяются деформационные устройства в качестве чувствительных элементов, например мембрана. При изменении давления мембрана будет прогибается и смещение ее центра однозначно определяет давления газа или жидкости. Для преобразования линейного перемещения центра мембраны в унифицированный электрический выходной сигнал наибольшее распространения получили дифференциально-трансформаторные, ферродинамические преобразователи, а также преобразователи с магнитной компенсацией. Тип преобразователя выбирается в зависимости от вида преобразуемого механического сигнала (линейное или угловое перемещение, усилие) и заданного вида сигнала, передаваемого по линии связи (ток, напряжение, пневмосигнал и т.д.).

Современные измерительные преобразователи выпускаются с унифицированными выходными сигналами, что обеспечивает взаимозаменяемость средств измерений (вторичных приборов) и позволяет сократить типы вторичных приборов. Широкое распространение получили преобразователи с выходным сигналом переменного тока. Этот сигнал представляется в виде изменения взаимной индуктивности в диапазоне 0-10 мГ или в виде изменения напряжения – переменного тока в таких

пределах: –1…+1 В; 0…2 В; 1…3 В. Наиболее перспективными являются преобразователи с унифицированным выходным сигналом постоянного тока 0 – 5,0 – 20 и 4 – 20 мА; применяются также преобразователи с выходным сигналом напряжения постоянного тока с диапазоном его изменения 0 – 10 и 0 – 5 В, а также с частотным электрическим сигналом в диапазоне 4 – 7 кГц. Использование постоянного тока позволит избавиться от влияния индуктивности и емкости линии связи, повышает помехостойкость линии связи и обеспечивает их достаточную протяженность. Важным фактором является также возможность использования выпускаемых вторичных приборов постоянного тока, регулирующих приборов и средств вычислительной техники с входными сигналами постоянного тока. В некоторых отраслях промышленности, таких как химическая и пищевая, где электрические преобразователи применять нецелесообразно, широко применяются преобразователи с унифицированным пневматическим сигналом в пределах 20 – 100 кПа.

5.2 Дифференциально-трансформаторные преобразователи

Дифференциально – трансформаторные преобразователи (ДТП) предназначены для преобразования линейного перемещения сердечника, связанного с мембраной чувствительного элемента, в выходной электрический сигнал.



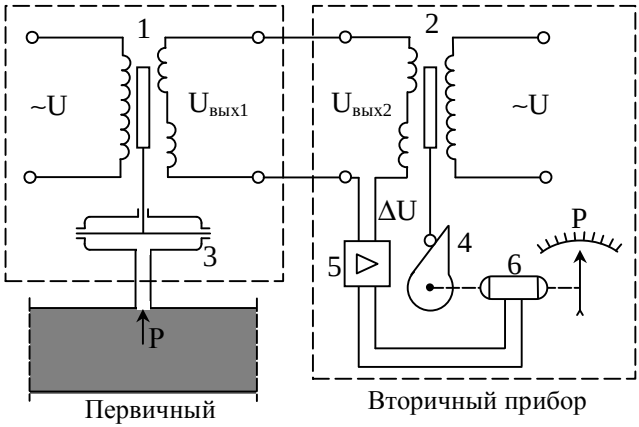
1 – первичная обмотка;
2, 3 – вторичные обмотки

Рисунок 5.2 – Схема дифференциального трансформаторного преобразователя

Принцип действия ДТП основан на зависимости взаимной индуктивности между первичной обмоткой (обмоткой возбуждения) и вторичной обмоткой от положения сердечника. Преобразователь представляет собой трансформатор (рисунок 5.2), имеющий обмотку возбуждения 1 и две секции 2 и 3 вторичной обмотки, включенные встречно. Создаваемый первичной обмоткой переменный магнитный поток будет пронизывать обе секции вторичной обмотки, возбуждая в них переменные ЭДС U_1 и U_2. Если сердечник располагается симметрично относительно двух секций вторичной обмотки (как показано на рисунке 5.2), то $U_1=U_2$ и результирующее напряжение между точками "а" и "б"

будет равно нулю. При увеличении давления Р мембрана чувствительного элемента прогибается и сердечник переместится вверх на определенную величину. При этом, увеличится магнитный поток через верхнюю обмотку 2 и, наоборот, уменьшится магнитный поток через нижнюю обмотку 3. Соответственно этому возрастет напряжение U_1 и уменьшится напряжение U_2. Между точками "а" и "б" появится результирующее напряжение, равное $\Delta U=U_1-U_2$. При уменьшении давления Р сердечник переместится вниз и при этом U_2 будет возрастать, а U_1 уменьшаться. Между точками "а" и "б" напряжение также возрастет (по модулю), но фаза его будет обратной. Таким образом, значение и фаза выходного сигнала ΔU зависят от положения сердечника между обмотками индуктивности (первичной и вторичной), т.е. от величины давления в объекте.

Для дистанционной передачи электрического сигнала от ДТП преобразователя (первичный прибор) ко вторичному прибору, расположенному на щите управления объектом, используется компенсационная схема (рисунок 5.3). Основная часть вторичного прибора – дифференциально-трансформаторный преобразователь 2, имеющий характеристику и конструкцию аналогичную ДТП первичного прибора 1. В первичном приборе-преобразователе сердечник перемещается при повороте профилированного кулачка 4. Выходное напряжение



1 – ДТП первичного прибора; 2 – ДТП вторичного прибора; 3 – пружинный элемент; 4 – профилированный кулачок; 5 – усилитель; 6 – реверсивный двигатель

Рисунок 5.1 – Схема дистанционной передачи давления с использованием дифференциально-трансформаторных преобразователей

$U_{вых1}$ первичного прибора направлено навстречу выходному напряжению $U_{вых2}$ вторичного прибора. Результирующее напряжение $\Delta U=U_{вых1}-U_{вых2}$ поступает на электронный усилитель 5, который питает реверсивный двигатель 6.

При рассмотрении действия измерительной схемы предположим, что перед измерением сердечники двух приборов (первичного и вторичного) находятся в среднем положении (как представлено на рисунке 5.3). При этом, выходные напряжения двух приборов будут равны ($U_{вых1}=U_{вых2}$), а разность этих напряжений будет равна нулю ($\Delta U=0$).

Изменение давления Р в объекте приведет к перемещению сердечника первичного прибора (вверх или вниз в зависимости от величины давления), и при этом нарушится равенство напряжений $U_{вых1}$ и $U_{вых2}$. Появившаяся разность напряжений ΔU усиливается и приведет в движение реверсивный двигатель. Двигатель, поворачивая кулачок, перемещает сердечник ДТП вторичного прибора, который будет установлен в такое положение, при котором $U_{вых1}=U_{вых2}$. При этом $\Delta U=0$ и двигатель остановится, а сердечник ДТП во вторичном приборе переместится на такую же величину, как и сердечник в первичном приборе. Таким образом, каждому положению сердечника ДТП первичного прибора (т.е. определенному значению давления) соответствует вполне определенное положение сердечника ДТП вторичного прибора. Показывающая стрелка (или регистрирующее устройство), кинематически связанная с реверсивным двигателем, укажет на значение давления в объекте в момент измерения.

Достоинством компенсационного метода измерения давления с использованием дифференциально-трансформаторного преобразователя является отсутствие влияния колебания питающего напряжения и частоты на точность показания вторичного прибора. Это связано с тем, что все изменения параметров питающего напряжения одинаково влияют на работу ДТП первичного и вторичного приборов.

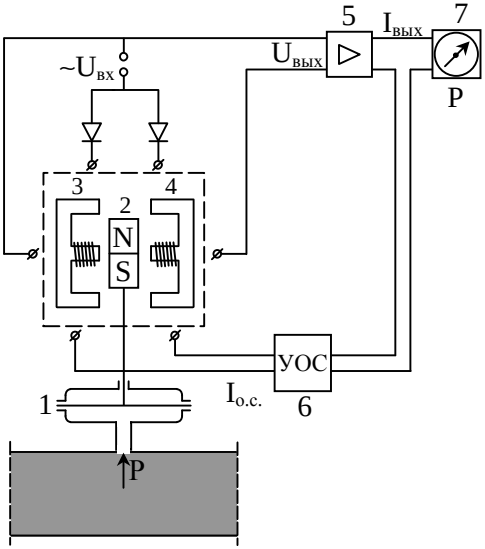
Дифференциально-трансформаторные преобразователи просты по устройству, надежны в работе и на их показание не оказывают влияния изменение температуры, давления, влажности и запыленности окружающей среды. К недостаткам этих преобразователей следует отнести невозможность подключения к ним нескольких одновременно работающих вторичных приборов. Кроме того, система дистанционной передачи с ДТП, как и все системы передач на переменном токе, подвержены влиянию внешних магнитных полей и соседних линий

связи, что вызывает дополнительную погрешность измерения. Указанных недостатков лишены преобразователи с магнитной компенсацией и преобразователи с передачей сигналов на постоянном токе.

5.3 Преобразователи с магнитной компенсацией

Передающие преобразователи с магнитной компенсацией предназначены для преобразования линейного перемещения чувствительного элемента первичного прибора в унифицированный выходной сигнал постоянного тока.

Принцип действия преобразователя заключается в том, что магнитный поток в одном магнитопроводе, изменяющийся при перемещении возле него постоянного магнита, компенсируется магнитным потоком другого магнитопровода за счет тока обратной связи. При этом, устанавливается определенная зависимость между выходным током и перемещением подвижного элемента (постоянного магнита), а значит, и значением измеряемой величины.



1 – мембрана; 2 – постоянный магнит; 3 – левый магнитопровод; 4 – правый магнитопровод; 5 – усилитель; 6 – устройство обратной связи; 7 – вторичный измерительный прибор.

Рисунок 5.4 – Структурная схема преобразователя с магнитной компенсацией

Структурная схема преобразователя приведена на рисунке 5.4. Упругий чувствительный элемент 1 (мембрана) первичного преобразователя преобразует измеряемую величину (давление) в линейное перемещение постоянного магнита 2. При перемещении магнита изменяется магнитный поток в левом магнитопроводе 3 и на выходе преобразователя появляется напряжение $U_{вых}$, которое усилителем 5 преобразуется в выходной токовый сигнал $I_{вых}$.

Выходной ток $I_{вых}$ поступает в линию дистанционной передачи и одновременно в устройство обратной связи 6, выходной ток которого $I_{о.с.}$ создает магнитный поток в

правом магнитопроводе 4, который компенсирует магнитный поток левого магнитопровода. Таким образом, при увеличении измеряемой величины (давления Р) увеличивается смещение постоянного магнита 2, увеличивается магнитный поток в магнитопроводе 3 и, следовательно, необходим больший выходной ток $I_{вых}$ и ток обратной связи $I_{о.с.}$ для взаимной компенсации двух магнитных потоков, образующихся в двух магнитопроводах.

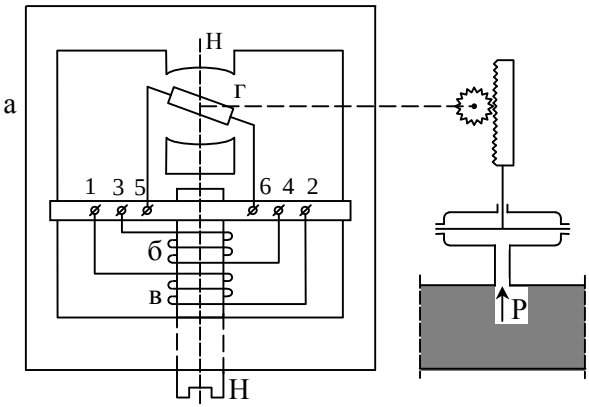
Устройство обратной связи 6 (УОС) позволяет установить необходимый закон преобразования, т.е. $I_{вых}=f(P)$. Эта зависимость может быть либо линейной (в приборах для измерения давления, разности давлений, уровня), либо квадратичной (в расходомерах по перепаду давления на сужающем устройстве). Вторичный прибор 7, измеряя $I_{вых}$, укажет значение измеряемой величины Р.

Преобразователи с магнитной компенсацией обладают рядом достоинств: возможностью подключения нескольких вторичных приборов к одному преобразователю, виброустойчивостью и надежностью. К недостаткам таких преобразователей следует отнести довольно высокую температурную погрешность и невозможность работы в агрессивной среде, влияющей на работу электронной аппаратуры, находящейся в корпусе первичного преобразователя. Преобразователи этого типа имеют класс точности 1,0 и 1,5. В качестве вторичных приборов используются миллиамперметры с соответствующим диапазоном измерения.

5.4 Ферродинамические преобразователи

Ферродинамические преобразователи применяются в измерительных устройствах для преобразования угловых перемещений чувствительных элементов (мембран, сильфонов и др.) при измерении давления или перепада давления жидких или газообразных сред.

Принцип действия ферродинамических преобразователей основан на зависимости взаимной индуктивности между обмоткой возбуждения и рамкой от ее угла поворота, что приводит к зависимости наводимой в рамке ЭДС от угла поворота. Ферродинамический преобразователь (рисунок 5.5) содержит магнитопровод "а", обмотку возбуждения "б" с выводными контактами 3-4, обмотку смещения "в" с выводными контактами 1-2, поворотную рамку "г" с выводными контактами 5-6. Поворотная рамка кинематически связана с пружинным



а – магнитопровод; б – обмотка возбуждения; в – обмотка смещения; г – поворотная рамка
1, 2, 3, 4, 5, 6 - контакты

Рисунок 5.5 – Схема устройства ферродинамического преобразователя

элементом, воспринимающим изменение давления или перепада давления в объекте.

Магнитный поток в магнитопроводе, создаваемый обмоткой возбуждения (она питается переменным напряжением), индуктирует ЭДС в рамке и в обмотке смещения. Индуктируемая ЭДС в рамке зависит от тока питания обмотки возбуждения и взаимной индуктивности между рамкой и обмоткой возбуждения. Взаимная индуктивность изменяется при повороте рамки от нуля (когда плоскость рамки совпадает с магнитной нейтралью НН) до максимального значения, т.е. на угол $\alpha=\pm 20°$. Амплитудное значение ЭДС, наводимое в рамке, определяется по формуле:

$$E=2\cdot\pi\cdot f\cdot n\cdot S\cdot B_м\cdot\alpha, \qquad (5.1)$$

где f – частота;

n – число витков рамки;

S – площадь рамки;

$B_м$ – амплитудное значение индукции магнитного поля;

α - угол поворота рамки.

Таким образом, ЭДС, наводимая в рамке, линейно зависит от угла поворота рамки при неизменном значении остальных величин, входя-

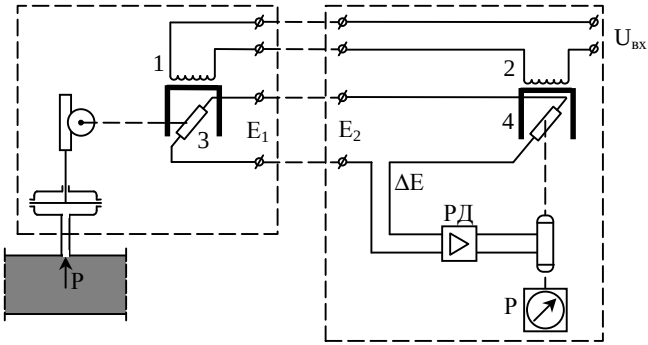
щих в формулу (5.1). Рамка ферродинамических преобразователей поворачивается в пределах ±20°, т. к. при больших углах нарушается линейность характеристики и увеличивается погрешность измерения. Магнитная система преобразователя рассчитана таким образом, что наводимая в рамке ЭДС изменяется от –1 В до +1 В при повороте рамки от –20° до +20°. Для получения на выводах рамки только положительных ЭДС последовательно с ней включается обмотка смещения. ЭДС, наводимая в обмотке смещения, суммируется с ЭДС рамки и выходное напряжение на рамке изменяется от 0 до +2 В. Преобразователи без обмотки смещения применяются в приборах с нулевой отметкой в центре шкалы (например, при измерении положительных и отрицательных давлений в рабочем пространстве нагревательных, плавильных печей, котлов и других объектов). Преобразователи с обмоткой смещения применяются в приборах с нулевой отметкой в начале шкалы.

Принципиальная схема дистанционной передачи показаний с использованием ферродинамических преобразователей без обмоток смещения представлена на рисунке 5.6. Обмотки возбуждения 1 и 2 передающего и компенсирующего преобразователей включены последовательно, чтобы исключить влияние на показания прибора изменения частоты f и напряжения $U_{вх}$ входного питания. Рамки преобразователей 3 и 4 включены встречно, вследствие чего на вход усилителя подается разность ЭДС ΔE передающего и компенсирующего преобразователей:

$$\Delta E = E_1 - E_2$$

При ΔE=0 на выходе усилителя сигнала нет и двигатель РД останавливается. При изменении давления (или перепада давления при измерении расхода сужающими устройствами) мембрана чувствительного элемента через механическую передачу поворачивает рамку передающего преобразователя, что приводит к изменению выходного напряжения E_1.

На выходе усилителя появляется сигнал небаланса ΔE, который усиливается и приводит во вращение вал реверсивного двигателя, кинематически связанного с рамкой компенсирующего преобразователя. Двигатель будет изменять положение рамки до момента равенства



1 – обмотка возбуждения передающего преобразователя;
2 – обмотка возбуждения компенсирующего преобразователя; 3, 4 – рамки преобразователей;
Рисунок 5.6 – Схема дистанционной передачи показаний с использованием ферродинамических преобразователей

ЭДС E_1 и E_2. После этого двигатель обесточится так как ΔE станет равным нулю и стрелка прибора установится на отметке, соответствующей значению измеряемого параметра.

В ферродинамической системе дистанционной передачи используются самопишущие и показывающие приборы, имеющие равномерную шкалу и класс точности по показаниям 1,0. Ферродинамические преобразователи обладают такими же достоинствами и недостатками, как и дифференциально-трансформаторные.

6 ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

6.1 Общие сведения

При проведении многих технологических процессов используются емкости, заполненные жидкой средой: баки-сепараторы на паровых котлах, водяные аккумуляторы, емкости с жидким топливом, емкости с химическими реактивами и др. Измерение уровня жидкой среды в различных ёмкостях может быть связано как с безопасной работой агрегата, так и с измерением количества жидкости, расходуемой из данной емкости. Таким образом, приборы – уровнемеры в зависимости от назначения могут выполнять различные функции: использование в системах автоматики для стабилизации значения уровня жидкой среды в заданных пределах, измерение по уровню количества жидкости в резервуаре, сигнализация предельных отклонений уровня от заданного значения.

На практике при выборе того или иного метода определения уровня необходимо учитывать различные условия измерения: агрессивность жидкой среды, различные физические и химические параметры жидкости (температура, давление, вязкость, плотность, электропроводность и другие параметры), открытые или закрытые резервуары, требования точности измерения и другие. В связи с этим применяются следующие методы измерения уровня жидких сред в резервуарах:

- визуальные;
- гидростатические;
- буйковые, поплавковые;
- емкостные;
- индуктивные;
- радиоизотопные;
- радиоволновые;
- акустические;
- термокондуктометрические.

6.2 Визуальные уровнемеры

В визуальных уровнемерах используется принцип сообщающихся сосудов. Стеклянная трубка с нанесенными делениями одним кон-

цом соединяется с жидкостью, а другим - с газовой средой резервуара, в котором измеряется уровень жидкой среды визуальным способом (рисунок 6.1).

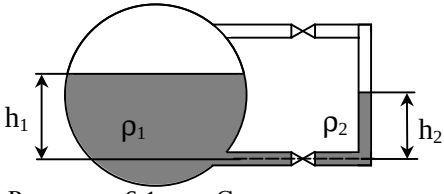


Рисунок 6.1 – Схема визуального уровнемера

Погрешность измерения в таких уровнемерах может возникать из-за разности плотностей жидкости в резервуаре и в указательной стеклянной трубке. Различие плотностей может быть обусловлена разными температурами жидкостей в резервуаре и трубке. Абсолютная погрешность измерения уровня может быть вычислена по формуле:

$$\Delta h = h_1 - h_2 \qquad (6.1)$$

Используя формулу гидростатического давления для сообщающихся сосудов, можно записать:

$$\rho_1 \cdot g \cdot h_1 = \rho_2 \cdot g \cdot h_2 \text{ или } \rho_1 \cdot h_1 = \rho_2 \cdot h_2 \qquad (6.2)$$

Отсюда погрешность измерения определится:

$$\Delta h = h_1 \left[1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right] \qquad (6.3)$$

Действительное значение уровня жидкости в резервуаре можно определить, используя выражение (6.2):

$$h_1 = h_2 \frac{\rho_2}{\rho_1} \qquad (6.4)$$

Как видно из уравнения (6.3) и (6.4), погрешность измерения Δh и действительное значение h_1 можно определить при известных температурах жидкости в резервуаре t_1 и в стеклянной трубке t_2, по которым находятся плотности ρ_1 и ρ_2 по справочным данным. С целью уменьшения погрешности обычно производится либо тепловая изоляция уровнемера, либо продувка его жидкостью из резервуара перед отсчетом.

6.3 Гидростатические уровнемеры

В гидростатических уровнемерах измерение уровня жидкой среды производится по величине гидростатического давления, создаваемого столбом жидкости H, находящейся в объекте измерения (откры-

том и закрытом резервуаре, барабане котла, аккумуляторах тепла, конденсаторах турбины и др.), т.е.:

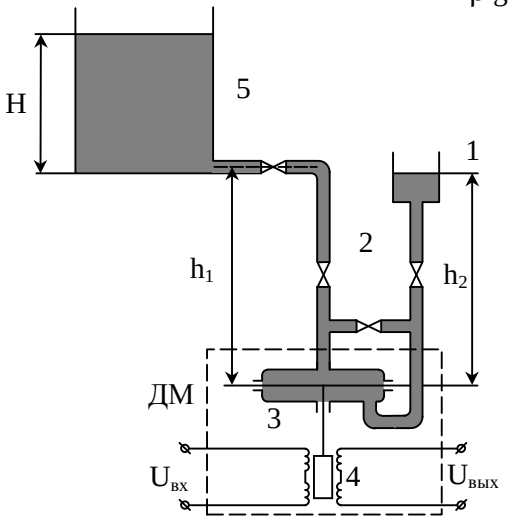
$$P=\rho \cdot g \cdot h. \qquad (6.5)$$

Чаще всего для измерения давления P столба жидкости применяются дифманометры с электрическим выходным сигналом. Схема подключения дифманометра к открытому резервуару, находящемуся под атмосферным давлением, показана на рисунке 6.2. Чувствительным элементом в гидростатическом уровнемере являются пружины дифманометра с плоской мембраной 3. Манометр связан с резервуаром 5 и уравнительным сосудом 1 двумя импульсными трубками 2, заполненными водой (или другой жидкостью). Столб жидкости h_2 в уравнительной линии поддерживается постоянным. Дифманометр измеряет разность давлений, действующих на его чувствительный элемент в левой и правой импульсных трубках, т.е.:

$$\Delta P=P_1 - P_2=(H+h_1)\rho_1 \cdot g - h_2 \cdot \rho_2 \cdot g \qquad (6.6)$$

Если плотности ρ_1 и ρ_2 жидкости в обеих импульсных трубках одинаковы и если $h_1=h_2$, то:

$$\Delta P=\rho \cdot g \cdot H.$$



1 – уравнительный сосуд; 2 – импульсные трубки; 3 – пружинный элемент дифманометра; 4 – электрический преобразователь; 5 – резервуар; ДМ – дифманометр

Рисунок 6.2 – Схема гидростатического уровнемера

Из формулы (6.6) видно, что показания уровнемера будут изменяться при изменении плотности жидкости, находящейся в резервуаре и в импульсных трубках. Для исключения этой погрешности импульсные трубки прокладываются близко друг от друга. Другая погрешность, как видно из этой же формулы, связана с изменением уровня жидкости в уравнительном сосуде, так как высота h_2 зависит от колебания уровня H в резервуаре. Чем больше H, тем больше прогиб мембраны в пружинном дифманометре 3 и тем больший объем жидкости вытесняется из нижней половины дифманомет-

ра в уравнительный сосуд. Для уменьшения этой погрешности устанавливают уравнительный сосуд с большим поперечным сечением, при этом, большие колебания уровня Н в резервуаре не вызовут больших колебаний h_2 в уравнительном сосуде.

Колебание уровня жидкости в резервуаре Н изменяет давление ΔP на плоскую мембрану дифманометра, от прогиба которой перемещается сердечник дифференциально – трансформаторного преобразователя. Выходная электрическая величина (выходное напряжение $U_{вых}$ или индуктивность), таким образом, однозначно определяется значением уровня жидкости в резервуаре и измеряется вторичным измерительным прибором, установленным на пульте управления объектом. Электрическая величина $U_{вых}$ может быть использована также в системах автоматического регулирования уровня Н и в системах сигнализации.

Гидростатические уровнемеры получили наиболее широкое распространение для измерения уровня воды в барабанах паровых котлов. Работа такого барабана отличается такими особенностями: высоким давлением и температурой воды и пара, интенсивным выделением пара из воды, значительным изменением плотности воды и пара при колебаниях давления и температуры во время неустановившихся режимов и в процессе пуска котла.

Простейшей схемой измерения уровня воды (жидкости) в барабане котла (в резервуаре под давлением) является схема с использованием однокамерного уравнительного сосуда (рисунок 6.3). Уравнительный сосуд 1 подсоединяется к паровому пространству барабана, а импульсная трубка 3 подключается непосредственно к водяному пространству барабана. Перепад давления ΔP, измеряемый дифманометром 4,определяется разностью давлений, создаваемых в левой (минусовой) импульсной трубке P_1, и правой (плюсовой) уравнительной линии P_2, которые соответственно равны:

$P_1=(h - H)\rho_п \cdot g + H \cdot \rho_ж \cdot g + h_0 \cdot \rho_1 \cdot g$ – давление в левой трубке;

$P_2=(h+h_0) \cdot \rho_2 \cdot g$ – давление в правой трубке;

где $\rho_п$ – плотность пара;

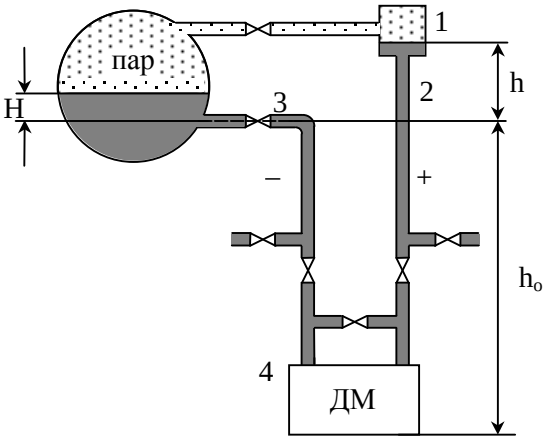
$\rho_ж$ – плотность воды в барабане;

ρ_1 – плотность воды в левой трубке;

ρ_2 – плотность воды в правой трубке.

Таким образом, перепад ΔP, действующий на дифманометр, будет определяться выражением:

$$\Delta P=P_1 - P_2=[(h-H)\rho_п+H \cdot \rho_ж+h_0\rho_1 - (h+h_0)\rho_2] \qquad (6.7)$$



1 – уравнительный сосуд; 2 – правая импульсная трубка; 3 – левая импульсная трубка; 4 –дифманометр (ДМ)

Рисунок 6.3 – Схема уровнемера с однокамерным уравнительным сосудом

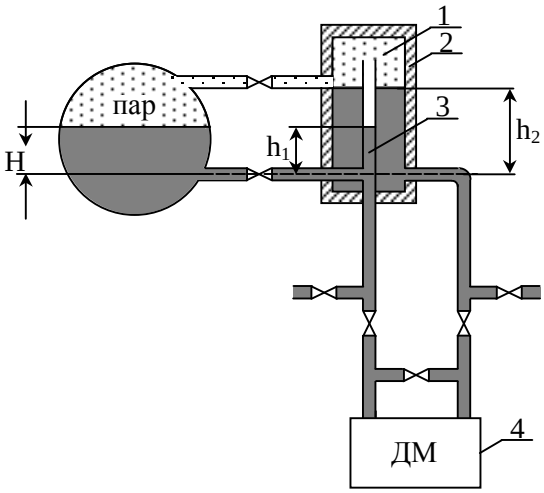
Как видно из формулы (6.7), показание уровнемера зависит не только от текущего уровня жидкости в барабане H, но и от плотности воды в барабане $\rho_ж$, в импульсных трубках ρ_1 и ρ_2, а также от плотности пара в барабане. поэтому расчет шкалы дифманометров-уровнемеров производят на рабочее (номинальное) давление в барабане. Кроме того, на результат измерения оказывает влияние изменение плотности воды ρ_1 и ρ_2 в импульсных трубках, что может происходить при изменении температуры окружающей среды или температуры воды в барабане.

На практике для определения действительного значений уровня воды в барабане котельной установки применяют расчетные таблицы или графики, по которым вводится поправка в показание дифманометра на температуру и давление пароводяной среды в барабане, а также на температуру окружающей среды. Уровнемеры с однокамерными уравнительными сосудами применяются на котлах с номинальным давлением пара до 4,5 МПа. При больших давлениях используются уровнемеры с двухкамерным уравнительным сосудом. В этих уровнемерах для уменьшения влияния температур окружающей среды и воды в барабане на показания дифманометра используется двухкамерный уравнительный сосуд (рисунок 6.4). Внешняя поверхность уравнительного сосуда 1 покрыта тепловой изоляцией 2 для того, чтобы плотность воды в нем и во внутренней трубке 3, соединенной с водяным пространством барабана, была равна плотности воды в барабане. Такая конструкция уровнемера позволяет иметь одинаковые уровни воды в барабане H и во внутренней трубке h_1, т.е. H= h_1. Для такой схемы уравнение для перепада давления ΔP, действующего на

дифманометр 4, имеет вид:

$$\Delta P=h_2\cdot\rho_в\cdot g - [h_1\cdot\rho_в\cdot g+(h_2 - h_1)\rho_п\cdot g]=(h_2-h_1)(\rho_в - \rho_п) \quad (6.8)$$

где $\rho_в$, $\rho_п$ – плотности воды и пара в барабане.



1 – уравнительный сосуд; 2 – тепловая изоляция; 3 – внутренняя трубка; 4 –дифманометр (ДМ)

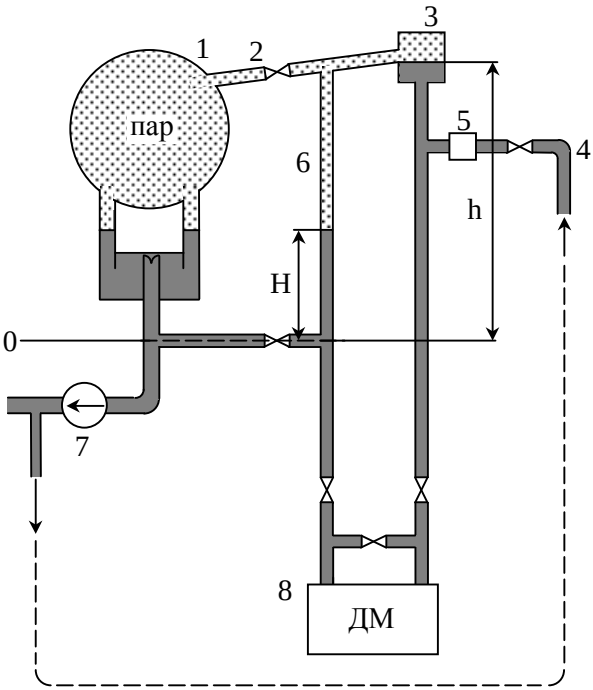
Рисунок 6.4 – Схема уровнемера с двухкамерным уравнительным сосудом

Как видно из приведенного уравнения (6.8), даже при использовании двухкамерного уравнительного сосуда показания уровнемера зависят от разности плотностей воды и пара $\rho_в - \rho_п$, которая может меняться при изменении режима работы агрегата.

В уровнемерах с двухкамерными уравнительными сосудами важное значение имеет обеспечение равенства температур в барабане и в уравнительном сосуде. При изменении температуры в сосуде относительно барабана появляется дополнительная погрешность из-за нарушения равенства гидростатического давления воды в барабане и во внутренней трубке, а также из-за изменения гидростатического давления в уравнительном сосуде.

Гидростатические уравнения получили большое распространение для измерения уровня конденсата (воды) в конденсаторах турбин на тепловых электростанциях. Эффективность работы конденсаторов зависит от точного измерения уровня конденсата и стабилизации его значения с использованием системы автоматического регулирования. Так, повышение уровня воды в конденсаторе приводит к затоплению нижних рядов охлаждающих труб, что вызывает переохлаждение конденсата, приводящее к дополнительной потере тепла и к снижению КПД котельной установки. И, наоборот, значительное понижение уровня конденсата ухудшает работу конденсатного насоса вследствие уменьшения подпора со стороны всасывающей трубы насоса.

Схема измерения уровня в конденсаторе турбины приведена на рисунке 6.5. Однокамерный уравнительный сосуд 3 соединяется



1 – конденсатор; 2 – соединительная труба; 3 – уравнительный сосуд; 4 –конденсатопровод; 5 – диафрагма; 6 – импульсная трубка; 7 – конденсатный насос

Рисунок 6.5 – Схема измерения уровня воды в конденсаторе турбины

посредством трубы 2 с паровым пространством конденсатора 1, а труба 6 присоединена ко всасывающей трубе конденсатного насоса 7. По трубе 4 через ограничительную диафрагму 5 непрерывно поступает в небольшом количестве конденсат из напорной линии конденсатного насоса.

Благодаря такой схеме уровень воды в сосуде 3 поддерживается постоянным, так как подаваемый в него конденсат полностью восполняет убыль воды из сосуда вследствие ее испарения. При небольшом избытке конденсата, он будет стекать в конденсатор по трубе 2.

Уравнительный сосуд 3 в данной схеме измерения уровня можно не покрывать изоляцией, т.к. температура конденсата в конденсаторе мало отличается от температуры воздуха, окружающего уравнительный сосуд.

Перепад давлений ΔP, действующий на дифманометр, определяется по уравнению:

$$\Delta P=[h\cdot\rho_в - H\cdot\rho_в – (h - H)\rho_п]g,$$

или

$$\Delta P= (h - H)(\rho_в - \rho_п)g, \qquad (6.9)$$

где $\rho_в$ – плотность воды столбов H и h, кг/м^3;

$\rho_п$ – плотность воды в конденсаторе, кг/м^3.

Если учесть, что плотность воды $\rho_в$ значительно больше плотности пара $\rho_п$, находящегося в конденсаторе при низких давлениях, то уравнение (6.9) можно представить в более простом виде:

$$\Delta P = (h - H)\rho_в g. \qquad (6.10)$$

Все рассмотренные схемы гидростатических уровнемеров не обеспечивают полной независимости показаний от изменений параметров (температуры, давления, состава и др.) как измеряемой жидкости, так и окружающей среды. Для более точного определения уровня жидкой среды необходимо использовать расчетные поправочные коэффициенты.

6.4 Поплавковые и буйковые уровнемеры

В поплавковых уровнемерах измерение уровня производится по положению поплавка, который перемещается вертикально вместе с уровнем жидкости.

Наибольшее распространение получили уровнемеры с механической связью поплавка с измерительным устройством. Об уровне в этом случае судят по положению прикрепленного к противовесу указателя, соединенного с поплавком при помощи троса, перекинутого через блок (рисунок 6.6). Этот метод применяется для резервуаров, находящихся под атмосферным давлением, и расположенных недалеко от места наблюдения. Использование гибких элементов (троса, ленты) для получения информации о положении поплавка затруднено для резервуаров под давлением из-за сложности герметизации выводов.

Для дистанционного измерения уровня жидкости можно применить катушку индуктивности, внутри которой перемешается сердечник, прикрепленный к тросу. Выходным сигналом является индуктивность катушки, сердечник которой через трос связан с положением поплавка, т.е. со значением уровня.

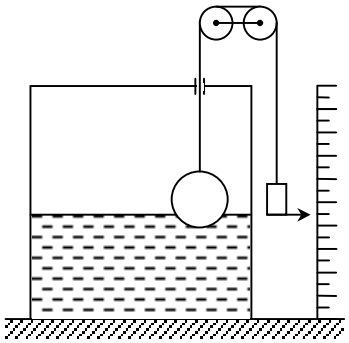


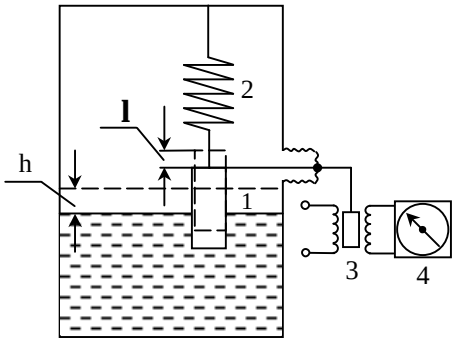
Рисунок 6.6 – Схема поплавкового уровнемера

Точность измерения уровня зависит в основном от постоянства плотности жидкой среды, находящейся в резервуаре. При колебаниях величины плотности (например, из-за изменения температуры, состава и других характеристик среды) изменяется величина погружной части

поплавка. Уменьшение погрешности из-за колебания плотности жидкости может быть достигнуто либо увеличением диаметра поплавка, либо уменьшением веса поплавка. Однако, уменьшение массы поплавка ограничивается обеспечением требуемого натяжения троса, а увеличение диаметра поплавка ограничивается конструктивными размерами уровнемера.

Поплавковые уровнемеры обладают определенными достоинствами: простотой конструкции, большим диапазоном измерения (до 12 м), достаточно высокой точностью (погрешность не более 2 %), возможностью измерения уровня агрессивных и вязких сред, широким температурным диапазоном измерения (при небольших колебаниях конкретной температуры). Недостатками этого способа измерении уровня является наличие поплавка в резервуаре и трудности измерения уровня в резервуарах под давлением.

Для измерения уровня жидких сред в резервуарах, находящихся под избыточным или вакуумметрическим давлением, находят широкое применение буйковые уровнемеры с дистанционной передачей данных на щит контроля и регулирования технологическим процессом. Действие буйкового уровнемера основано на законе Архимеда, т.е. зависимости выталкивающей силы, действующей на буек, от уровня жидкости. В качестве чувствительного элемента в таких уровнемерах используется массивное тело (например, цилиндр) – буек 1, подвешенное вертикально внутри сосуда и частично погруженное в жидкую среду (рисунок 6.7). Буек закреплен на пружинной подвеске, которая действует на буек с определенным усилием. При увеличении уровня жидкости на величину h от нулевого положения сразу же возникает выталкивающая сила, которая поднимает буек на величину *l*, которая будет меньше h, т.к. плотность буйка больше плотности жидкости. При подъеме буйка произойдет сжатие пружины на величину *l* и вся система придет в новое состояние равновесия. Возникающая дополнительная выталкивающая сила, действующая



1 – буек; 2 – пружина; 3 – индукционный преобразователь; 4 – измерительный прибор

Рисунок 6.7 – Схема буйкового уровнемера.

на буек со стороны жидкости и уменьшенная со стороны газа, уравновесится силой сжатия пружины, что можно выразить следующим равенством:

$$c\cdot \mathbf{l} = (h - \mathbf{l})\cdot\rho_{ж}\cdot g\cdot F - (h - \mathbf{l})\cdot\rho_{г}\cdot g\cdot F, \qquad (6.11)$$

где c – коэффициент жесткости пружины;

$\rho_{ж}$, $\rho_{г}$ - плотность жидкости и газа;

F – площадь поперечного сечения буйка.

Отсюда величина уровня жидкости в резервуаре определяется:

$$h = \mathbf{l}\left(1 + \frac{c\cdot g\cdot F}{\rho_{ж} - \rho_{г}}\right). \qquad (6.12)$$

Если величины c, g, F, $\rho_{ж}$, $\rho_{г}$ (находящиеся в скобках) не изменяются в процессе измерения, то обозначив эту часть уравнения через постоянную величину "К", получим:

$$h = k\cdot \mathbf{l} \qquad (6.13)$$

Таким образом, статическая характеристика буйкового уровнемера линейна, а чувствительность этого метода может быть увеличена за счет увеличения площади сечения буйка "F" или уменьшения жесткости пружины "c".

Погрешность измерения уровня буйковым уровнемером, как видно из уравнения (6.11), может возникнуть за счет изменения величин c, g, F, $\rho_{ж}$, $\rho_{г}$. Так, при изменении температуры жидкости и давления газовой среды в резервуаре, заметно изменяются плотности $\rho_{ж}$, $\rho_{г}$. В этом случае в уравнение (6.11) вводятся поправки, рассчитанные по изменению плотностей жидкости и газа при известной температуре и давлении в резервуаре.

Буйковые уровнемеры позволяют измерять уровень в резервуарах с температурой жидкости до 400 °С и находящейся под давлением до 10 МПа. Выпускаемые уровнемеры, имеющие класс точности 1 и 1,5, изготавливаются с различными размерами (диаметром и длинной) буйка, позволяющими измерять уровень в широких пределах от 0-0,04 до 0 – 16 м.

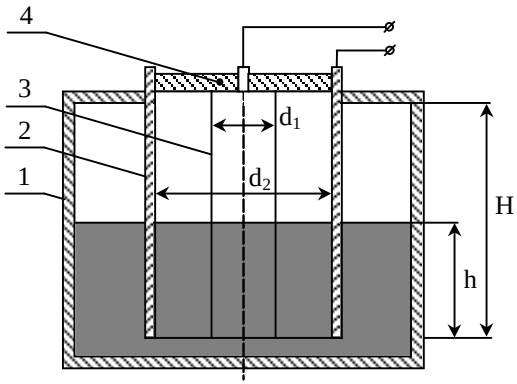
6.5 Емкостные уровнемеры

Действия емкостного уровнемера основано на изменении электрической емкости конденсатора, находящегося в жидкой среде, при изменении уровня жидкости в резервуаре.

Конденсатор, преобразующий изменение уровня жидкости в пропорциональное изменение емкости, представляет собой два коаксиаль-

но расположенных цилиндра, образующих два электрода конденсатора. Конструктивное выполнение конденсатора зависит от электропроводящих свойств жидкости. Принципиальное различие состоит в том, что один из электродов конденсатора для измерения уровня электропроводных жидкостей покрывается электрической изоляцией, а электроды конденсатора для неэлектропроводных жидкостей не изолируют.

В схемах емкостного уровнемера для неэлектропроводных жидкостей электроды выполняются цилиндрического или пластинчатого типа, а также в виде жесткого стержня или троса. В последнем случае вторым электродом служит металлическая стенка резервуара. На рисунке 6.8 показана схема устройства емкостного уровнемера, выполненного в виде цилиндрического конденсатора из двух коаксиально расположенных стальных труб 2 и 3, помещенных в резервуар 1, в котором производится измерение уровня. Общая емкость конденсатора будет определяться суммой емкостей двух частей конденсатора, расположенных одна в жидкой, а другая в газовой средах резервуара.



1 – резервуар; 2 – внешний электрод; 3 – внутренний электрод; 4 - изолятор

Рисунок 6.8 – Схема емкостного уровнемера для неэлектропроводной жидкости

Емкость части цилиндрического конденсатора, расположенного в жидкой среде, определяется по формуле:

$$C_l = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_ж h}{\ln \frac{d_2}{d_1}}. \qquad (6.14)$$

Для части конденстора, находящегося в газовой среде, емкость определяется по аналогичной формуле:

$$C_2 = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_г (H - h)}{\ln \frac{d_2}{d_1}} \qquad (6.15)$$

Суммарная емкость будет равна:

$$C=C_1+C_2=\frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{d_2}{d_1}}\left[h(\varepsilon_ж - \varepsilon_г) + \varepsilon_г H\right] \qquad (6.16)$$

Таким образом, емкость конденсатора однозначно зависит от измеряемого уровня h при неизменяемых значениях остальных величин, входящих в формулу 6.16. Однако, в рабочих условиях диэлектриче-

ская проницаемость жидкости $\varepsilon_ж$ зависит от изменения температуры, давления и состава жидкой среды, что часто встречается на практике. Изменением этой же величины ($\varepsilon_г$) для газовой и паровой среды можно пренебречь, т.к. для большинства газов и паров относительная диэлектрическая проницаемость незначительно отличается от единицы. Отрицательное влияние на работу емкостных уровнемеров оказывают активные сопротивления как изолятора 4, так и контролируемой жидкости в межэлектродном пространстве.

Для повышения точности измерения уровня емкостными уровнемерами в схемах используется дополнительный компенсационный конденсатор, располагаемый в жидкой среде ниже основного конденсатора. Это позволяет автоматически вводить поправку в показания уровнемера при отклонении $\varepsilon_ж$ от значения, принятого при градуировке прибора. Уменьшение влияния активного сопротивления достигается введением в электрическую схему фазового детектора, который отфильтровывает сигнал помехи, создаваемый активным сопротивлением.

В емкостных уровнемерах для измерения уровня электропроводной жидкости один из электродов конденсатора выполняется в виде изолированного стержня. Вторым электродом служат стенки металлического резервуара, в котором измеряют уровень жидкости. Если резервуар неметаллический, то в жидкость помещают металлический неизолированный стержень, выполняющий роль второго электрода.

В емкостных уровнемерах для измерения электрической емкости конденсатора используются мостовые и резонансные схемы. Наиболее простой является мостовая схема (рисунок 6.9), состоящая из двух вторичных обмоток трансформатора (питаемого генератором Г), емкости C_1 конденсатора находящегося в объекте (резервуаре), и подстроечного конденсатора C_2. Мост уравновешен при нулевом уровне жидкости в резервуаре, при этом сигнал на входе и выходе усилителя равен нулю.

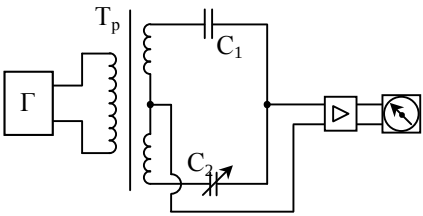


Рисунок 6.9 – Принципиальная электрическая схема емкостного уровнемера

При увеличении уровня емкость конденсатора, находящегося в резервуаре, увеличивается и напряжение на входе усилителя возрастает. Усиленный сигнал преобразуется в унифицированный (0 – 100 мВ) и измеряется вторичным прибором, в качестве которого может быть использован автоматический потенциометр или миллиамперметр.

Диапазон измерения уровня емкостными уровнемерами зависит от характеристики жидкости, типом конденсатора (как чувствительного элемента), способом его установки на резервуаре и составляет от 1 до 20 м.

Емкостные уровнемеры нашли большое распространение из-за простоты конструкции, отсутствия подвижных элементов, возможности использования в широком диапазоне температур жидкости (от –40 до +200 °С) и давлений (до 6 МПа). Недостатками таких уровнемеров являются: непригодность для измерения уровня вязких сред (более 1 Па·с), пленкообразующих, кристаллизирующихся и выпадающих в осадок жидкостей, а также высокую чувствительность к изменению электрических свойств жидкости.

6.6 Индуктивные уровнемеры

Действие индуктивных уровнемеров основано на зависимости индуктивности одиночной катушки (соленоида) или взаимной индуктивности двух катушек от глубины погружения их в электропроводную жидкость. Под действием переменного магнитного поля катушки индуктивности в жидкой среде создаются вихревые токи, магнитное поле которых, по закону Ленца направлено навстречу магнитному полю катушки. Т.е. результирующее магнитное поле будет меньше поля не погруженной в жидкость катушки, т.е. индуктивность погруженной катушки меньше индуктивности "сухой" катушки. Таким образом, полное электрическое сопротивление, включая индуктивное, одиночной катушки будет однозначно определяться глубиной погружения ее в жидкость, что позволяет определить уровень жидкой среды в измеряемом объекте.

На практике большое распространение получили индуктивные уровнемеры, содержащие две индуктивно связанные катушки, образующие трансформатор (рисунок 6.10). При изменении уровня изменяется индуктивность двух катушек, определяемая по формуле:

$$M = k\sqrt{L_1 L_2}\,, \qquad (6.17)$$

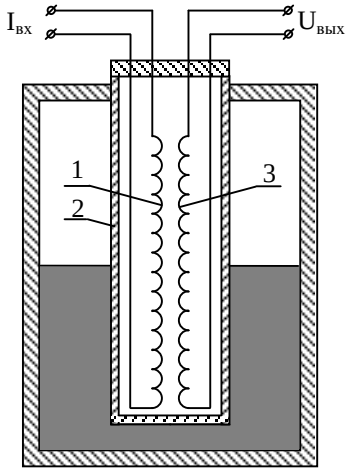
где k – коэффициент связи;

L_1 и L_2 – индуктивности одной и второй катушек.

Выходное напряжение на выходе второй катушки равно:

$$U_{вых} = kI_{вх}\sqrt{L_1 L_2}\,. \qquad (6.18)$$

Измеряя $U_{вых}$, можно определить значение уровня жидкой среды в объекте.



1 – обмотка возбуждения; 2 – вторичная обмотка; 3 – защитный чехол

Рисунок 6.10 – Схема индуктивного уровнемера

На рисунке 6.10 представлена простейшая схема индуктивного трансформаторного уровнемера, состоящего из обмотки возбуждения 1, по которой протекает переменный ток возбуждения $I_{вх}$, и вторичной обмотки 2, с которой снимается выходной сигнал $U_{вых}$.

Две обмотки уровнемера помещены в металлически защищенный чехол 3, который герметично закреплен в крышке резервуара, что позволяет осуществить замену катушек без нарушения герметичности уровнемера.

При работе уровнемера переменный магнитный поток, создаваемый обмоткой возбуждения, инициирует возникновение вихревых токов в толще контролируемой жидкой среды. Это приводит к зависимости взаимной индуктивности между обмотками от уровня жидкости. Таим образом, выходное напряжение $U_{вых}$ вторичной обмотки будет однозначно зависеть (зависимость линейная) от уровня жидкости в резервуаре.

К основному недостатку индуктивных уровнемеров следует отнести влияние изменения температуры жидкой среды на результат измерения. С изменением температуры изменяется: активное сопротивление обмоток, длина проводников в обмотках, проводимость защитного чехла, проводимость жидкой среды. Кроме того, на результат измерения оказывает влияние изменение состава среды, изменение свойств материала чехла и наличие на нем пленок расплава или окислов. Учесть влияние различных факторов на точность измерения затруднительно из-за сложного влияния их на погрешность. Поэтому такие уровнемеры применяются для измерения уровня расплавленных металлов постоянного состава и температуры, например, жидкометаллического теплоносителя в ядерных энергетических установках.

Значительное снижение влияния различных факторов на точность измерения уровня достигается в индуктивных уровнемерах дискретного действия. Уровнемер представляет собой ряд коротких катушек индуктивности (рисунок 6.11), помещенных в виде столба

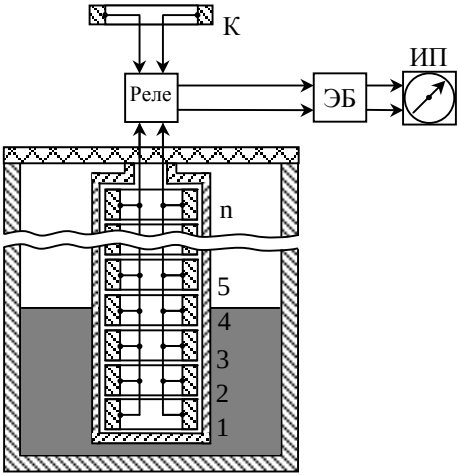


Рисунок 6.11 – Схема дискретного индуктивного уровнемера

внутри металлического чехла, отделяющего катушки от среды. Индуктивность каждой катушки зависит от того, погружена она в жидкость или нет, поэтому индуктивность погруженной катушки меньше индуктивности не погруженной. Все рабочие катушки 1,2,3… n и контрольная катушка "k" включены в следящую логическую схему (ЭБ – электронный блок), которая отыскивает первую сверху катушку, расположенную ниже уровня жидкости, и сравнивает ее индуктивность с индуктивностью контрольной катушки. Информацию о номере катушки, расположенной на границе жидкость – газ, поступает на измерительный прибор (ИП), что дает возможность определить значение уровня жидкой среды в резервуаре.

Особенностью работы дискретного индуктивного уровнемера является то, что следящая система не измеряет непосредственно индуктивность рабочих катушек, а отыскивает две соседние катушки с резко отличающимися индуктивностями, причем количественное различие индуктивностей значения не имеет. Такая схема измерения уровня не реагирует на изменение различных параметров среды (температуры, давления, состава) и эти измерения не могут влиять на точность измерения. Погрешность измерения будет определяться только дискретностью (т.е. через определенный интервал) определения линии раздела жидкой и газовой фаз. Шаг (интервал) дискретности, а значит и погрешность, будет равна высоте h соседних катушек и расстояния δ между ними, т.е.:

$$\Delta=\delta+(h_1+h_2)/2, \qquad (6.19)$$

где h_1 и h_2 – высоты соседних катушек (они могут быть одинаковы или различны в зависимости от участка измерения уровня – в крайних точках или возле условного нулевого уровня). Это дает возможность значительно повысить точность измерения уровня жидкой среды путем уменьшения высоты катушек и расстояния между ними на рабочих участках измерения уровня (на остальных участках высота катушек может быть увеличена).

6.7 Акустические уровнемеры

В акустических уровнемерах используются ультразвуковые колебания, распространяющиеся в газовой или жидкой средах, и в зависимости от способа использования этих колебаний они делятся на локационные, поглощения и резонансные.

В локационных уровнемерах используется эффект отражения ультразвуковых колебаний от границы раздела жидкость-газ. Положение уровня определяется по времени прохождения ультразвуковых колебаний от источника до приемника после отражения их от поверхности раздела.

В уровнемерах поглощения положение уровня определяется по ослаблению интенсивности ультразвука при прохождении через слой жидкости или газа.

В резонансных уровнемерах измерение уровня производится посредством измерения частоты собственных колебаний столба газа над поверхностью жидкости, которая зависит от уровня жидкости.

Наибольшее распространение получили локационные уровнемеры. В этих приборах ультразвук пропускают либо сверху, через газовую среду (такие уровнемеры называют акустическими), либо снизу, через слой жидкости (такие уровнемеры называют ультразвуковыми). Достоинством акустических уровнемеров является то, что на показаниях этих приборов не сказывается изменение физических и химических свойств жидкости. Однако, изменение температуры и давления газовой среды влияет на точность измерения уровня, что является недостатком акустических уровнемеров. Поэтому такие уровнемеры используются для жидкостей, имеющих температуру не более 80 °С и давление не более 4 МПа.

Уровнемеры, основанные на пропускании ультразвука через жидкость (ультразвуковые), используются для сред под высоким давлением и для них требуется небольшая мощность излучателя. Однако, такие приборы очень чувствительны к наличию пузырьков газов в жидкости, а также к колебаниям температуры и давления в жидкой среде, что вызывает дополнительную погрешность измерения.

Упрощенная схема акустического уровнемера представлена на рисунке 6.12, в котором источником (И) и одновременно приемником (П) отраженных ультразвуковых колебаний является пьезоэлемент. Генератор (Г) высокочастотных электрических импульсов возбуждает в пьезоэлементе ультразвуковые колебания, которые отражаются от

поверхности воды и возвращаются обратно на пьезоэлемент. Одновременно генератор включает схему измерения времени ($\Delta\tau$), на который поступает усиленный блоком (У) сигнал от пьезоэлемента, образованный возвращенной ультразвуковой волной.

Измеренное временным блоком время $\Delta\tau$ будет определяться по скорости ультразвука в газовой среде и пройденным путем по формуле:

$$\Delta\tau = \frac{2(H - h)}{C} \qquad (6.20)$$

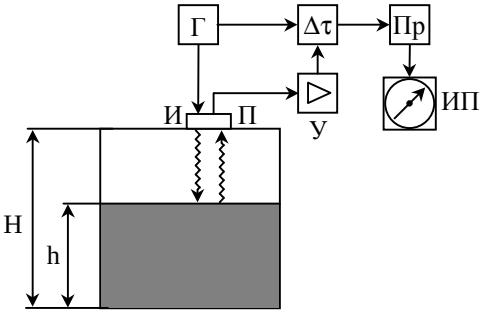


Рисунок 6.12 – Схема акустического уровнемера

Преобразователь (Пр) преобразует значение времени в унифицированный выходной сигнал, измеряемый вторичным измерительным прибором (ИП).

Для уменьшения влияния изменения температуры газовой среды, находящейся над жидкостью, имеется блок температурной компенсации, включающий в себя термометр сопротивления, расположенный возле пьезоэлемента. Используемые на практике акустические уровнемеры имеют класс точности 2.5.

7 АНАЛИЗ СОСТАВА ГАЗОВ

7.1 Общие положения

Измерение состава газовой среды производится в различных отраслях промышленности, в научных исследованиях, при проведении экологических мониторингов окружающей атмосферы и в других случаях.

Можно выделить следующие основные цели газового анализа:

– определение теплоты сжигания газообразного топлива по известному составу горючих компонентов газовой смеси. Высшая теплота сгорания топлива рассчитывается по формуле:

$$Q_в = \frac{q_{H_2} \cdot \%H_2 + q_{CO} \cdot \%CO + q_{CH_4} \cdot \%CH_4 + ...}{100}, \quad (7.1)$$

где q_{H_2}, q_{CO}, q_{CH_4} и т.д. – тепловые эффекты реакции горения компонентов, Дж/м^3 (берутся из справочных данных);

$\%H_2$, $\%CO$, $\%CH_4$ и т. д. – объемная концентрация горючих компонентов в газовой смеси.

– контроль качества сжигания топлива по составу продуктов сгорания. При полном сгорании топлива в продуктах сгорания на выходе из тепловых агрегатов должны содержаться только негорючие компоненты, такие как CO_2, H_2O, N_2 и O_2. Для правильного ведения процесса горения топлива необходимо поддерживать определенное соотношение между количествами подаваемых в топочное пространство агрегата топлива и воздуха. При недостаточном количестве воздуха в продуктах сгорания появляются такие горючие компоненты, как CO, H_2 и другие. Избыточное количество воздуха обеспечивает полное сгорание топлива, но требует дополнительных затрат на нагрев избыточного объема воздуха, который является балластом, уносящим из агрегата неиспользованное физическое тепло. Необходимое соотношение топливо-воздух может быть установлено на основе газового анализа.

– контроль состава технологических газов, к которым относятся такие газы, как кислород, азот, аргон, водород, эндогаз, экзогаз и другие. Они применяются для ускорения процесса выплавки стали и чугуна (кислород), при рафинировании

жидкого металла в рабочем пространстве агрегата или в ковше (аргон, азот), для защиты стальных изделий от окисления при нагреве (эндогаз, аргон) и для других технологических процессов. Технологические газы должны иметь определенный состав (или чистоту), что определяет качество технологических операций.

- контроль состава воздушной атмосферы для определения концентрации вредных для окружающей среды газообразных веществ, таких как оксиды (NO, NO_2, SO_2, SO_3, CO_2 и др.), фенолы, бензол, аммиак, горючие взрывоопасные газы (CO, CH_4 и др.).

Приборы, предназначенные для количественного определения состава газа, называются газоанализаторами. В зависимости от назначения они подразделяются на переносные и автоматические. Переносные газоанализаторы применяются в лабораторных условиях при выполнении исследовательских работ, при испытаниях и наладке различных промышленных теплотехнических установок (плавильных, нагревательных и термических печей, паровых и водогрейных котлов, сушильных установок и др.). Автоматические газоанализаторы предназначены для непрерывного автоматического измерения содержания одного или нескольких компонентов в газовой смеси. На основе непрерывного контроля газовой среды в рабочем пространстве промышленного агрегата может осуществляться автоматизированное управление технологическим процессом.

Газоанализаторы в зависимости от способа определения концентрации отдельных компонентов газовой смеси делятся на:

- химические (химические свойства газовых молекул);
- тепловые (физические свойства газа);
- магнитные (магнитные свойства газа);
- оптические (способность поглощать электромагнитные волны);
- хроматографические (адсорбционные свойства газовых молекул);
- спектрометрические (спектральные свойства газа).

Газоанализаторы обычно градуируются в процентах по объему. Такой способ градуировки шкалы газоанализаторов удобен, так как процентная доля отдельных компонентов в общем объеме остается неизменной при изменении давления и температуры газовой смеси.

7.2 Химические газоанализаторы

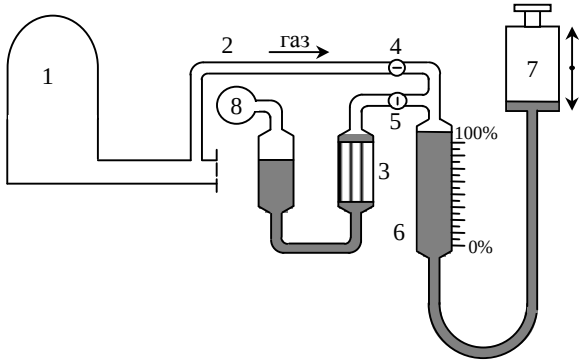
В химических газоанализаторах определение концентрации отдельных компонентов газовой смеси производится методом поглоще-

ния этих компонентов химическими реактивами. По уменьшению начального мерного объема газа определяют содержание данного компонента в газовой смеси.

Для многих компонентов газа разработаны селективные химические реактивы, которые поглощают (реагируют) только анализируемый компонент. Непоглощенный остаток анализируемого газа поступает в газоизмерительное устройство, где измеряется уменьшение объема, соответствующее поглощенному компоненту. Этот метод применяется как в переносных газоанализаторах ручного действия, называемых часто приборами Орса, так и в автоматических.

Наибольшее распространение получили переносные газоанализаторы для определения качества сжигания топлива во время пусконаладочных работ тепловых агрегатов, использующих твердое, жидкое или газообразное топливо. При этом анализируются три компонента: CO_2, O_2 и CO. Такие газоанализаторы применяются также для контроля и градуировки автоматических газоанализаторов на эти же компоненты.

Схема устройства газоанализатора для анализа одного компонента из газовой смеси представлена на рисунке 7.1. Анализируемый газ из объекта 1 поступает в газоанализатор по газовому тракту 2 при открытом вентиле 4 и закрытом вентиле 5. Мерное количество газа (50 или 100 мл) поступает в измерительную бюретку 6 за счет разряжения, создаваемого опусканием уравнительного сосуда 7. Дистиллированная вода из сосуда 6 перетекает в сосуд 7, а анализируемый газ полностью заполняет измерительную бюретку 6, после чего кран 4 закрывается, а кран 5 открывается. Поднимая уравнительный сосуд 7, вытесняют анализируемый объем газа в поглотительный сосуд 3, заполненный селективным химическим реактивом, который поглощает только один компонент из анализируемой газовой смеси. Для увеличения поверхности со-



1 – объект; 2 – газовая трасса; 3 – поглотительный сосуд; 4, 5 – запорные краны; 6 – измерительная бюретка; 7 – уравнительный сосуд; 8 – резиновый мешок

Рисунок 7.1 - Схема химического газоанализатора

прикосновения между анализируемым газом и реактивом поглотительный сосуд заполнен стеклянными трубками. Прокачивая анализируемый газ несколько раз через реактив, можно добиться полного поглощения данного компонента.

Остаточный объем газа возвращают в измерительную бюретку, имеющую градуировку в объемных процентах от 0 до 100%. Уровень жидкости в измерительной бюретке укажет на содержание анализируемого компонента в газовой смеси. При необходимости определить концентрацию других компонентов, содержащихся в газовой смеси, используют несколько поглотительных сосудов, заполненных соответствующими реактивами, которые выборочно поглощают анализируемые компоненты.

В газоанализаторах типа Орса применяются следующие химические реактивы: раствор едкого калия КОН для поглощения CO_2, пирогаллоловая кислота $C_6H_3(OH)_3$ – для O_2, раствор полухлористой меди $CuCl_2$ с нашатырным спиртом NH_4Cl и аммиаком NH_3 – для CO. Переносные химические газоанализаторы обладают достаточной для производственных условий точностью измерения с погрешностью в пределах 0,5 – 1% при использовании свежеприготовленных реактивов и хорошего состояния аппаратуры. К числу достоинств объемного метода измерения концентрации газов относятся: возможность измерения большого количества компонентов газовых смесей путем подбора соответствующих химических реактивов; возможность анализа многокомпонентных газовых смесей; простота устройства.

Недостатками метода являются: невозможность измерения малых концентраций, так как цена деления измерительной бюретки составляет 0,1 мл; периодичность действия, составляющая 20-30 анализов в час; необходимость частой замены реактивов; невозможность использования в системах автоматического регулирования.

7.3 Тепловые газоанализаторы

В тепловых газоанализаторах для определения концентрации какого-либо компонента в газовой смеси используются ее тепловые свойства, такие как теплопроводность, тепловой эффект реакции каталитического окисления (термохимические) и др.

Наибольшее распространение получили термокондуктометрические газоанализаторы, основанные на резком различии коэффициента теплопроводности одного из компонентов по сравнению с остальными компонентами анализируемой газовой смеси. Так, например, тепло-

проводность таких газов как H_2, CO_2, SO_2, CH_4, He, Ar значительно отличается от теплопроводности воздуха, и если в воздушной среде имеется один из этих компонентов, то изменение величины теплопроводности газовой смеси будет определятся изменением содержания данного анализируемого компонента.

Анализ многокомпонентной газовой смеси по ее теплопроводности можно производить при условии, что все компоненты газовой смеси, кроме определяемого, имеют примерно одинаковую теплопроводность. Если в газовой смеси имеются компоненты, которые могут влиять на теплопроводность смеси и концентрацию которых определять не требуется, то эти компоненты из газовой смеси должны быть удалены перед началом анализа. Так, например, при измерении концентрации CO_2 в дымовых газах необходимо удалить такие компоненты как H_2 и SO_2, содержащиеся в небольшом количестве, но влияющих на общую теплопроводность.

В тепловых газоанализаторах для определения концентрации отдельных компонентов используются мостовые схемы, в которых плечами моста являются платиновые спирали, нагретые до температуры 100 °С и помещенные в газовые камеры. Газоанализатор состоит из четырех газовых камер, две из которых R_2 и R_4 являются рабочими, через которые непрерывно прокачивается анализируемый газ (рисунок 7.2). Две другие герметичные газовые камеры R_1 и R_3 служат в качестве сравнительных, в которых находится газ постоянного состава. Так, например, в газоанализаторах, предназначенных для определения CO_2 в газовой смеси, сравнительным газом является воздух.

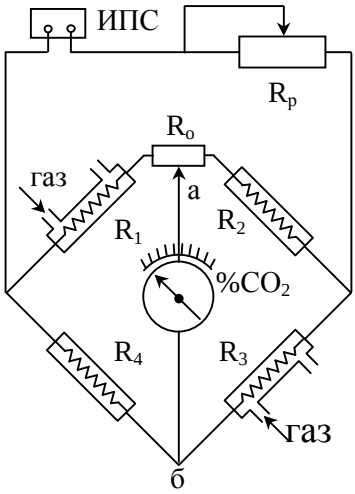


Рисунок 7.2 – Измерительная мостовая схема термокондуктометрического газоанализатора

При прокачивании анализируемого газа, содержащего, например, CO_2 и концентрацию которого надо определить, через противоположные газовые камеры R_1 и R_3 изменяется теплопроводность газового слоя, расположенного между платиновой проволокой и стенкой каме-

ры. С увеличением концентрации CO_2 в газовой смеси уменьшается теплопроводность газа, ухудшается теплообмен, что приводит к увеличению температуры платиновой проволоки в камерах R_1 и R_3. Появившийся разбаланс моста, измеряемый величиной напряжения между точками «а» и «б», определяется из выражения:

$$E_{а,б}=к\cdot (R_1 \cdot R_3 – R_2 \cdot R_4) \qquad (7.2)$$

где к – коэффициент пропорциональности.

Как видно из формулы (7.2), при протекании анализируемого газа через противоположные камеры резко увеличивается чувствительность прибора, т.к. напряжение $E_{а,б}$ зависит от произведения величин сопротивления платиновых проволок в измерительных камерах R_1 и R_3.

В качестве измерительного прибора, измеряющего разность потенциалов $E_{а,б}$ между точками «а» и «б» и отградуированного в объемных процентах анализируемого компонента газовой смеси, используются показывающие милливольтметры или регистрирующие потенциометры.

Питание мостовой измерительной схемы в современных газоанализаторах осуществляется постоянным током от источника стабилизированного питания (ИПС). Резистор $R_р$, включенный в цепь питания предназначен для установки такого тока питания моста при градуировке газоанализатора, чтобы температура платиновых проволок во всех газовых камерах была близка к 100 °С. Входящий в мост переменный резистор $R_о$ служит для устранения начального небаланса моста, когда в газовых камерах перед началом измерения находятся одинаковые составы газовых смесей.

Пределы допускаемой основной погрешности термокондуктометрических газоанализаторов для определения CO_2 в газовой смеси не превышают 2 – 2,5% диапазона измерения. Изменение показаний газоанализаторов при изменении температуры окружающего воздуха от 20 до 50 °С не превышает ±2 – 2,5 %.

Термокондуктометрический принцип (измерение по теплопроводности) измерение применяется для определения (кроме CO_2) таких компонентов, как H_2, SO_2, Ar, O_2, NH_3 в топочных газах и в газах при производстве аммиака, хлора, аргона, серной кислоты, а также для определения концентрации водорода в системе водородного охлаждения турбогенераторов на тепловых электростанциях. Недостатками таких типов газоанализаторов являются большое время установления показаний (инерционность), достигающее 120 секунд и повышенная погрешность (до 5%).

7.4 Магнитные газоанализаторы

Магнитные газоанализаторы используются для определения только концентрации кислорода в газовой смеси, т.к. кислород в отличие от других газов обладает сильными магнитными свойствами, являясь парамагнитным веществом. Если относительную магнитную восприимчивость кислорода принять за единицу, то эта величина для всех остальных газов на два порядка меньше, чем у кислорода. Т.е. все газы, кроме кислорода, являются практически немагнитными веществами. Таким образом, магнитные свойства газовой смеси зависят от концентрации кислорода в газе, а такие газы как NO и NO_2, проявляющие незначительные магнитные свойства, практически не оказывают влияние на магнетизм газовой смеси из-за их малых концентраций.

Существует несколько методов измерения магнитной восприимчивости газовой смеси, содержащей кислород. Наибольшее распространение получил метод, носящий название термомагнитной конвекции. В магнитном газоанализаторе анализируемый газ под действием магнитного поля втягивается в специальную измерительную камеру, в которой находится нагреваемый током чувствительный элемент. Газ, соприкасаясь с чувствительным элементом, нагревается и кислород теряет свои магнитные свойства. Вследствие этого, нагретый газ выталкивается из камеры, расположенной в магнитном поле, холодным газом и таким образом, возникает непрерывный поток газа через измерительную камеру.

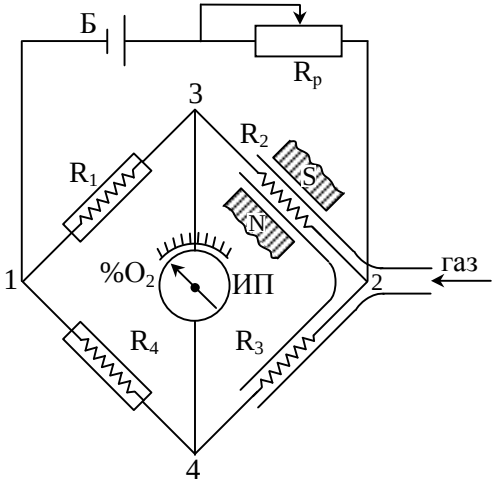


Рисунок 7.3 – Схема магнитного газоанализатора

На рисунке 7.3 представлена схема магнитного газоанализатора, в котором используется схема измерения на основе неуравновешенного моста. Мостовая схема питается постоянным током (от батареи Б или источника стабилизированного питания), который подводится к питающей диагонали 1 – 2. Все плечи моста R_1, R_2, R_3, R_4, представляют собой платиновые нагреватели выполненные из проволоки диаметром 0,02 мм, намо-

танные на стеклянный стержень.

Через две измерительные камеры R_2 и R_3 непрерывно прокачивается анализируемый газ, содержащий кислород. Одна из камер R_2 помещена в поле постоянного магнита. Чем больше содержание кислорода в газовой смеси, тем больший объем газа втягивается в магнитное поле, проходя через нагреватель R_2. Таким образом, температура нагревателя R_2 будет определяться содержанием кислорода в анализируемом газе. Больший объем газа, проходящий через магнитную камеру R_2 по сравнению с камерой R_3, понижает температуру нагревателя R_2 и уменьшает его электрическое сопротивление. Возникший разбаланс моста, т.е. $R_1R_3 > R_4R_2$, приведет к появлению разности потенциалов между точками 3 и 4, измеряемое вольтметром ИП с градуировкой процентного содержания кислорода в газовой смеси.

Одномостовая измерительная схема магнитного газоанализатора применяется как в переносном, так и в стационарном варианте для измерения содержания кислорода в продуктах сгорания нагревательных и плавильных печей, а также котельных установок. Предельная погрешность прибора зависит от диапазона измерения и находится в интервале от ±2 до ±10 % нормирующего значения. Последняя цифра соответствует минимальному диапазону измерения прибора.

В автоматических магнитных газоанализаторах, которые используются в системах автоматического регулирования качества сжигания топлива, применяется двухмостовая измерительная схема, представленная на рисунке 7.4. Один из мостов является рабочим, и его резисторы R_1 и R_2, представляющие собой платиновые элементы, омываются анализируемым газом. Резистор R_1 находится между полюсами постоянного магнита. Резисторы R_3 и R_4 являются постоянными и выполнены из манганиновой проволоки.

Второй мост является мостом сравнения. Его плечи R_5 и R_6, выполненные из платиновой проволоки, омываются воздухом. Резисторы R_7 и R_8 выполнены из манганиновой проволоки.

При наличии кислорода в газовой смеси и в результате воздействия магнитного поля на кислород газ проходит через газовую камеру рабочего моста, омывая резисторы R_1 и R_2. Мост выходит из равновесия и в измерительной диагонали между точками «а» и «в» возникает напряжение $U_{аб}$, которое зависит от содержания кислорода в газе. Через резисторы R_5 и R_6 моста сравнения прокачивается постоянное количество воздуха и поскольку концентрация кислорода в воздухе является стабильной, мост развивает стабильное напряжение $U_{св}$ между точками «с» и «в». Разностный сигнал $\Delta U = U_{ав} - U_{св}$ между двумя мос-

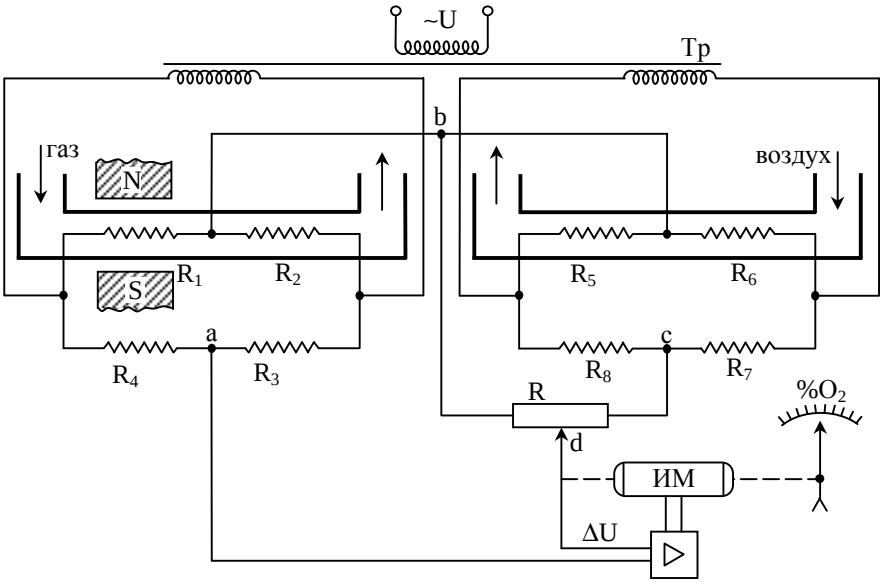


Рисунок 7.4 – Схема автоматического магнитного газоанализатора

товыми схемам поступает на электронный усилитель, далее на исполнительный механизм ИМ, который перемещает движок переменного резистора R до тех пор, пока падение напряжения на части резистора R не будет равно ΔU. В момент компенсации этих двух напряжений двигатель ИМ остановится, а положение движка R или угол поворота вала ИМ будет определять содержание кислорода в анализируемом газе. Достоинством двухмостовых автоматических магнитных газоанализаторов является независимость показаний от таких факторов как колебания напряжения питания, температуры, давления и влажности окружающей среды. Это объясняется одновременным влиянием перечисленных факторов на электрические сигналы рабочего и сравнительных мостов, а при выделении разностного сигнала уничтожаются все помехи и формируется только полезный сигнал, зависящий только от содержания кислорода в газе.

7.5 Оптические газоанализаторы

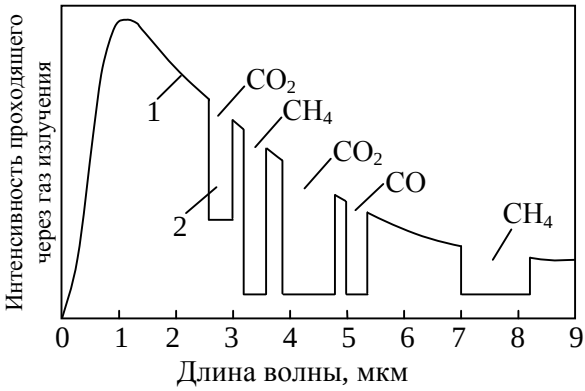
В оптических газоанализаторах используются следующие оптические свойства газовой смеси, которые зависят от состава газа:

- поглощение лучистой (электромагнитной) энергии в инфракрасной, ультрафиолетовой и видимой областях спектра;

- смещение интерференционных полос вследствие изменения оптической плотности газовой среды при пропускании через газовый слой определенной толщины двух когерентных лучей;
- излучение (эмиссия) лучистой энергии отдельных компонентов газовой смеси, зависящее от концентрации этого количества в газе.

Наибольшее распространение в различных отраслях промышленности получили газоанализаторы, основанные на поглощении инфракрасной энергии. Они применяются для определения концентрации окиси углерода (CO), двуокиси углерода (CO_2), метана (CH_4), аммиака (NH_3) и других компонентов, находящихся в различных газовых смесях. Это объясняется тем, что в инфракрасной области спектра эти газы имеют интенсивные и отличительные друг от друга интервалы (полосы) поглощения (рисунок 7.5). Как видно из рисунка, если через газовую смесь, содержащую, например, CO_2, CH_4 и CO, пропускать лучистую энергию в интервале длин волн от 0 до 9 мкм, то каждый компонент поглощает энергию в характерном (своем) диапазоне длин волн. По количеству поглощенной энергии в характерном диапазоне длин волн можно определить содержание конкретного газа в газовой смеси при постоянной толщине газового слоя.

В зависимости от принципа измерения поглощенной энергии анализируемым компонентом газовой смеси существующие газоанализаторы этого типа делятся на несколько групп и имеют различные наименования. Наибольшее применение получили газоанализаторы, в которых используется селективный оптико-акустический лучеприемник, который измеряет остаток непоглощенной данным компонентом лучистой энергии. Величина (интенсивность) непоглощенной энергии



1 – кривая излучения черного тела;
2 – поглощенная часть энергии

Рисунок 7.5 – Спектр поглощения лучистой энергии газовыми молекулами

определяется по закону Ламберта – Бера:

$$E_\lambda = E_{0\lambda} \cdot e^{-kcx}, \qquad (7.3)$$

где $E_{0\lambda}$,E_λ - интенсивность лучистой (монохроматической) энергии до и после прохождения через анализируемый газ;

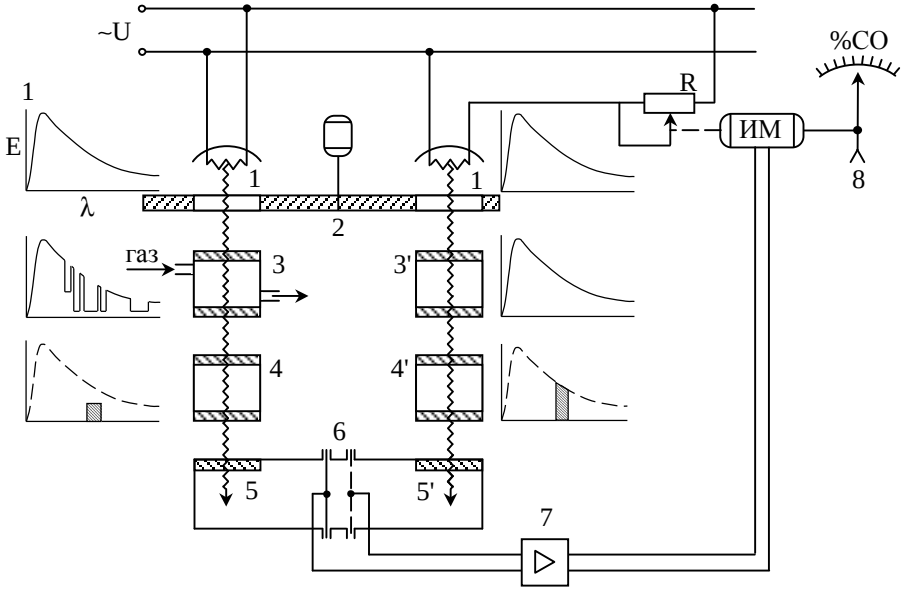
k – коэффициент поглощения, характерный для анализируемого компонента газовой смеси и определенной длины волны лучистой энергии, проходящей через газ;

c – объемная концентрация анализируемого компонента (в долях единицы);

x – толщина поглощающего слоя газа.

В процессе измерения входящие в формулу (7.3) величины $E_{0\lambda}$, k, c, x известны и зависят только от типа газа. Поэтому, измеренная непоглощенная часть энергии E_λ однозначно определяет концентрацию анализируемого компонента в газовой смеси.

Рассмотрим работу оптико-акустического газоанализатора, принципиальная схема которого показана на рисунке 7.6. Потоки инфра-



1 – излучатели; 2 – обтюратор; 3 – газовая камера; 3' – нейтральная камера; 4, 4' – фильтровальные камеры; 5, 5' – поглотительные камеры; 6 – конденсатор; 7 – электронный блок с усилителем; 8 – исполнительный механизм

Рисунок 7.6 – Схема оптико-акустического газоанализатора

красного излучения (показаны стрелками) от двух излучателей 1 прерываются обтюратором (вращающийся диск с отверстиями) 2 и поступают в два оптических канала. Левый канал, являющийся рабочим, состоит из газовой камеры 3, через которую непрерывно прокачивается анализируемый газ; фильтровальной камеры 4; поглотительной камеры 5. Правый канал – канал сравнения – состоит из нейтральной камеры 3', в которой излучение практически не поглощается; фильтровальной камеры 4'; поглотительной камеры 5'.

На рисунке 7.6 в графической форме (форме кривых Планка) показано изменение спектра инфракрасного излучения при прохождении светового потока от излучателей до камер поглощения через левый и правый оптические каналы. При прохождении излучения через газовую камеру 3 левого канала произойдет частичное или полное поглощение световой энергии на отдельных интервалах длин волн, вызванное избирательным поглощением энергии каждым компонентом, находящемся в газовой смеси. Для определения содержания выбранного (анализируемого) компонента необходимо из всего спектра выделить только тот интервал, на котором поглощает энергию анализируемый компонент. С этой целью спектр пропускают через фильтровальную камеру, заполненную специальным многокомпонентным газом, который поглощает излучение на всех длинах волн (в инфракрасной области), кроме интервала, на котором поглощает энергию анализируемый компонент. Оставшаяся часть энергии (заштрихованный столбик), пропорциональная содержанию анализируемого компонента, поступает в поглотительную камеру 5, где полностью поглощается. При этом, повышается температура и давление в камере 5 (камера 5 заполнена поглотительным газом), значение которых зависит от содержания определяемого компонента в газовой смеси.

Инфракрасное излучение, поступающее в правый оптический канал, проходит сначала через нейтральную камеру 3′ для создания одинаковых физических условий работы с левым каналом. Камеры 3 и 3′ имеют одинаковые геометрические и оптические характеристики и в них соблюдаются равные условия ослабления световой энергии за счет отражения и поглощения излучения в оптической системе камер. Фильтровальная камера 4′, как и аналогичная в левом канале, пропускает излучение в таком же диапазоне длин волн, и вся эта энергия поглощается в камере 5′.

Камеры 5 и 5′ разделены двумя пластинками 6, одна из которых сплошная, а вторая - перфорированная. Две пластинки образуют плоский пластинчатый конденсатор. Емкость конденсатора зависит от

расстояния между пластинами, которая определяется перепадом давления между камерами 5 и 5′. При увеличении содержания анализируемого компонента уменьшается давление в камере 5 и возрастает перепад давления между камерами, что приводит к пропорциональному увеличению емкости конденсатора.

Электронный блок 7, связанный с конденсатором, вырабатывает электрический сигнал, пропорциональный содержанию анализируемого компонента в газовой смеси. Исполнительный механизм 8, питаемый от электронного блока, перемещает движок реостата R в сторону уменьшения мощности (яркости) инфракрасного излучения в правом оптическом канале. При равенстве интенсивностей инфракрасных излучений в камере 5 и 5′ электрическая система (конденсатор – электронный блок – исполнительный механизм) придет в состояние равновесия, т.к. сплошная пластина конденсатора останется неподвижной и сигнал на выходе электронного блока будет равен нулю.

Угол поворота вала исполнительного механизма будет однозначно определяться содержанием анализируемого компонента, а показывающее (регистрирующее) устройство укажет процентное содержание компонента в газовой смеси.

В оптико-акустических газоанализаторах периодическое прерывание инфракрасного излучения обтюратором производится для создания пульсирующего со звуковой частотой перепада давления в поглотительных камерах. Эти колебания передаются пластинкам конденсатора и преобразуются в переменный электрический сигнал, что повышает чувствительность, стабильность и точность работы электронного блока.

Газоанализаторы, работающие на звуковых частотах модуляции инфракрасного излучения получили наименование оптико-акустических газоанализаторов.

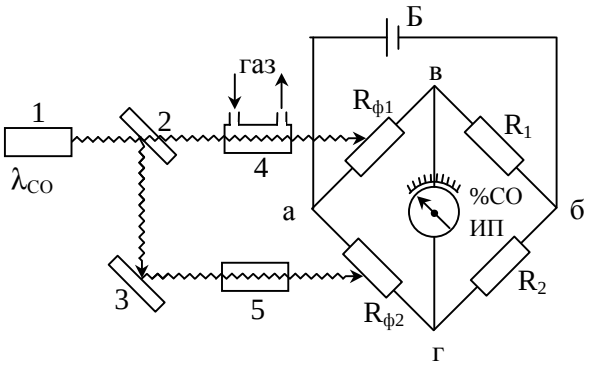
В настоящее время используются газоанализаторы с большей частотой модуляции (т.е. с большей скоростью вращения обтюратора) от 5 до 6 Гц и с газовой системой компенсации вместо электрической. Такая система измерения обеспечивает независимость показаний от изменения температуры окружающей среды, параметров конденсатора и электронного усиления.

Пределы допускаемой основной погрешности оптико-акустических газоанализаторов составляют ±2,5 % диапазона измерения.

7.6 Лазерный газоанализатор

В лазерном газоанализаторе монохроматический луч в очень узком диапазоне длин волн пропускается через анализируемый газ и по величине поглощения монохроматического излучения определяется содержание анализируемого компонента в газовой смеси. Для каждого компонента выбирается определенная (характерная) длина волны, излучение на которой хорошо поглощается только данным компонентом. Для анализа нескольких выбранных компонентов газовой смеси применяются либо несколько лазеров с различными длинами волн излучения, либо лазер с регулируемым диапазоном длин волн для каждого компонента.

На рисунке 7.7 представлена одна из схем лазерного газоанализатора, которая может быть реализована в показывающих и регистрирующих приборах как стационарного, так и переносного типа. Монохроматическое излучение лазера 1 на длине волны, соответствующей длине волны поглощения данным компонентом (например, λ_{CO} при анализе CO в газовой смеси), проходит оптическую систему, состоящую из полупрозрачного зеркала 2, и отражателя 3. Оптической системой луч лазера раздваивается на 2 одинаковых по интенсивности луча, которые проходят через две газовые камеры: рабочую 4, через которую непрерывно прокачивается анализируемый газ, и камеру 5 с нейтральным газом. При прохождении луча через рабочую камеру интенсивность его изменяется пропорционально содержанию анализируемого компонента в газовой смеси. Интенсивность луча, прошедшего через камеру с нейтральным газом, остается неизменной. Два луча попадают на соответствующие фоторезисторы, входящие в мостовую схему, при этом, сопротивление фоторезистора $R_{ф1}$ изменяется пропорционально содержанию анализи-



1 – лазер; 2 – полупрозрачное зеркало; 3 – отражатель; 4 – рабочая газовая камера; 5 – камера с нейтральным газом; 6 – измерительный мост

Рисунок 7.7 – Схема лазерного газоанализатора

руемого компонента, а сопротивление $R_{ф2}$ остается неизменным. Таким образом, напряжение в измерительной диагонали «в - г» будет однозначно определяться содержанием анализируемого компонента в газовой смеси, а измерительный прибор ИП укажет на объемную концентрацию этого компонента.

Использование лазерного луча, обладающего узким диапазоном длины волны, позволяет значительно повысить чувствительность и точность газового анализа, особенно при определении микроконцентраций отдельных компонентов в газовой смеси. Лазерные газоанализаторы используются для определения концентрации вредных примесей в газовых выбросах промышленных предприятий, в лабораторной и исследовательской практике и в других случаях.

7.7 Газовые хроматографы

Газовые хроматографы применяются для одновременного определения концентрации нескольких компонентов, находящихся в газовой смеси.

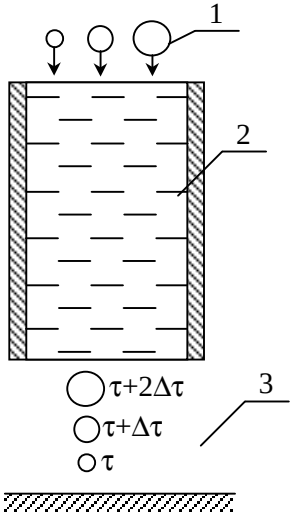
Действие хроматогрофов основано на разделении газовой смеси на отдельные компоненты при помощи специальных веществ, получивших название адсорбентов. В качестве адсорбентов в газовой хроматографии используются пористые вещества с большой поверхностью, такие как активированные угли, силикогели, алюмогели, цеолиты, тонкопористые стекла и др. После разделения газовой смеси каждый компонент анализируется отдельным детектором (определителем) с выдачей электрического сигнала, пропорционального концентрации анализируемого компонента.

Хромотографическое разделение веществ (жидких и газообразных) на отдельные компоненты было впервые применено русским ученым М.С. Цветом при исследовании пигментов, участвующих в фотосинтезе растений. При проведении исследований ученый имел дело с окрашенными веществами и поэтому используемый им метод разделения был назван хроматографией от слова «цвет».

Разделение газа на отдельные компоненты происходит из-за различной адсорбируемости компонентов твердыми адсорбентами, что связано с различной силой молекулярного взаимодействия между каждым анализируемым компонентом и адсорбентом.

Механизм разделения газов на отдельные компоненты можно упрощенно объяснить на примере движения трех шаров различного диаметра, как аналогию трех различных молекул, через ряд горизон-

тальных решеток, представляющих аналогию адсорбента (рисунок 7.8). При одновременном входе шаров в верхние ряды решеток первым в нижней части появится малый шар, за ним средний, и последним – большой шар, что объясняется различным сопротивлением со стороны решетки на движущиеся шары различных размеров.



1 – молекулы трех газов; 2 – адсорбент; 3 – время выхода молекул из адсорбента

Рисунок 7.8 – Схема, поясняющая работу хроматографа

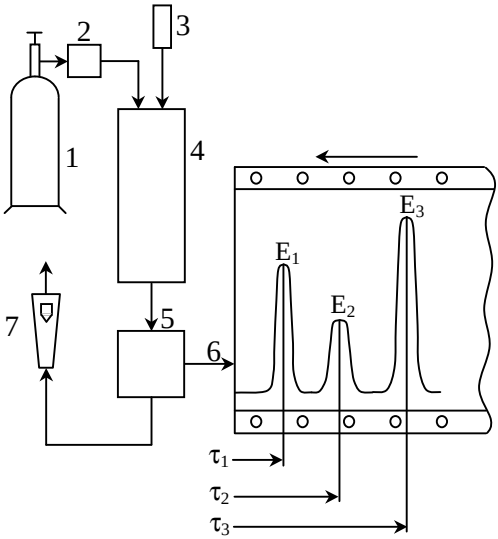
Аналогичное явление возникает при движении различных молекул через адсорбент, представляющий собой молекулярное сито. Молекулы газа, имеющие большую силу взаимодействия с молекулами адсорбента, будут отставать от молекул газа с меньшими силами взаимодействия (силами связи) с адсорбентом. Это приведет к разделению газа на выходе из адсорбента на отдельные компоненты, каждый из которых пройдет через соответствующие детекторы для определения его процентного содержания в газовой смеси.

Принципиальная схема газового хроматографа со вспомогательными элементами представлена на рисунке 7.9. Небольшой фиксированный объем анализируемого газа (от 0,1 до 20 $см^3$ в зависимости от типа прибора) из дозатора 3 вводится в разделительную колонку, где находится адсорбент. Из-за малого объема анализируемого газа его разбавляют газом – носителем, который непрерывно поступает из баллона 1 в разделительную колонку пройдя регулятор расхода 2 и обеспечивая постоянную скорость движения газовой смеси в разделительной колонке 4. В качестве газа – носителя используются как инертные газы (азот, аргон, гелий), так и другие газы (воздух, водород, углекислый газ) в зависимости от физико-химических свойств анализируемых газов.

В разделительной колонке, заполненной адсорбентом, анализируемая смесь разделяется на компоненты. Первым на выходе из колонки через время τ_1 появляется компонент, обладающий наименьшей адсорбционной способностью, следом, через время τ_2, второй компо-

нент, имеющий большую адсорбируемость, и последним (если газ состоит из трех компонентом) через время τ_3 выходит третий компонент, обладающий наибольшей адсорбционной способностью.

После разделения каждый компонент вместе с газом – носителем поступает в детектор 5, в котором производится анализ выбранных компонентов. Применяемые детекторы хроматографов основаны на использовании какого-либо физического или физико-химического свойства анализируемого компонента газовой смеси. Тип детектора и его характеристики определяют такие возможности хроматографа как длительность анализа, оптимальный объем пробы, режим анализа, и др. Детектор должен обладать малой инерционностью, высокой чувствительностью, стабильностью метрологических характеристик и линейной зависимостью выходного сигнала от концентрации анализируемого компонента.



1 – баллон с газом–носителем;
2 – регулятор расхода газа–носителя;
3 – дозатор анализируемого газа;
4 – разделительная колонка; 5 – детектор; 6 – участок диаграммной бумаги с хроматограммой; 7 - ротаметр
Рисунок 7.9 – Принципиальная схема газового хроматографа

Детектор после анализа каждого компонента выдает выходные электрические сигналы в виде функции времени и представляющие собой хроматографические пики, которые записываются на диаграммной ленте 6 (или изображаются на дисплее компьютера).

Хроматограмма дает представление о качественном и количественном составе анализируемой газовой смеси. Время выхода каждого компонента из разделительной колонки или, тоже самое, время появления сигнала (τ_1, τ_2, τ_3) на хроматограме дает информацию о природе каждого компонента, а площадь или высота пика (E_1, E_2, E_3) определяет количественный состав газовой смеси.

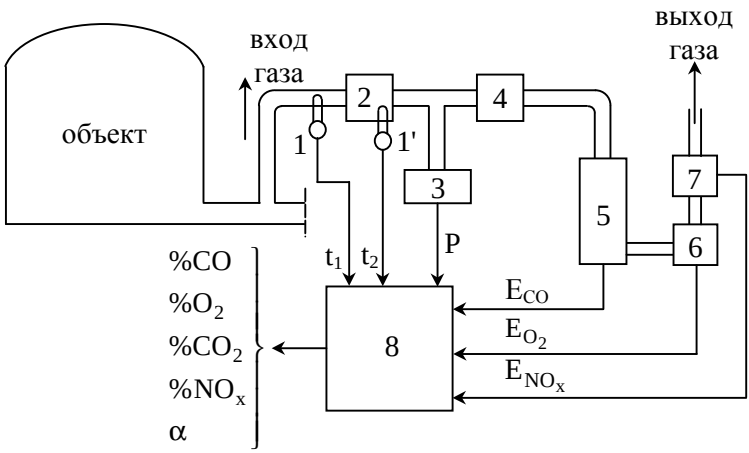
Перед проведением газового анализа хроматограф проходит калибровку, которая выполняется по контрольным смесям или по чистым газам. Полученная функциональная зависимость или так называемая градуировочная характеристика прибора может быть представлена либо графически, либо в виде калибровочных коэффициентов.

В настоящее время выпускаются хроматографы для лабораторного и промышленного использования. Лабораторные характеризуются повышенной точностью, универсальностью, большим числом анализируемых компонентов, повышенными требованиями к условиям эксплуатации и с компьютерной обработкой полученных хроматограмм. Промышленные хроматографы имеют более узкое назначение, а вырабатываемый ими сигнал используется при оперативном и автоматическом управлении технологическим процессом. Так, например, хроматограф из серии «Газохром» (Россия и Украина), относится к числу специализированных, предназначен для экспрессного определения концентрации O_2, CO_2, N_2, H_2, CO, CH_4 и углеводородов до бутана включительно в продуктах горения различных видов топлив, сжигаемых в промышленных и стационарных котельных, печах и других теплоиспользующих установках. Относительная погрешность измерения составляет ±5%, продолжительность анализа всех компонентов достигает 10 мин.

Большое распространение получили комбинированные газоанализаторы для промышленного использования при наладке теплового режима агрегатов и контроля качества сжигания топлива. В этих приборах используется портативный оптико-акустический газоанализатор для определения содержания CO в продуктах сгорания, а содержание кислорода и оксида азота определяется в отдельном блоке с использованием электрохимических ячеек (ЭХЯ).

Содержание CO_2 и определение коэффициента расхода воздуха производится аналитически в микропроцессорном блоке. На рисунке 7.10 приведена схема переносного комбинированного газоанализатора, состоящего из следующих основных блоков: пробозабоорника 2, фильтра 4, оптико-акустического анализатора 5 со вспомогательными элементами, электрохимических ячеек 6, для определения O_2 и NO_x, микропроцессорного устройства 8 с преобразователями сигналов датчиков температуры и давления.

Анализируемый газ (продукты сгорания топлива) непрерывно отсасывается из представительной точки объекта при помощи заборника 2.



1, 1' – термопары; 2 – пробозаборник; 3 – датчик абсолютного давления газа; 4 – фильтр; 5 – оптико-акустический анализатор; 6 – электрохимическая ячейка O_2; 7 – электрохимическая ячейка NO; 8 - микропроцессор
Рисунок 7.10 – Блок-схема газоанализатора для определения качества сжигания топлива

Далее газ проходит через фильтр 4 и направляется в оптико-акустический анализатор 5, который выдает электрический сигнал E_{CO}, пропорциональный содержанию CO в продуктах сгорания. Перед выходом газа в атмосферу он проходит электрохимическую ячейку 6, где производится анализ на O_2 при помощи электрохимического сенсора гальванического типа с выдачей электрического сигнала E_{O2}.

Электрические сигналы от датчиков и преобразователей поступают в микропроцессорный блок, который выдает информацию о составе анализируемого газа (%CO, $\%CO_2$, $\%O_2$, $\%NO_x$) и вычисленное значение коэффициента расхода воздуха α. Для измерения температуры газа t_1 в газоходе используется кабельная термопара типа КТМС хромель – алюмелевой градуировки, которая находится в пробозаборнике на входе газового потока. Температура окружающей среды t_2 измеряется цифровым датчиком температуры (микросхема DS1820), которая также располагается в пробозаборнике. Преобразованные сигналы от датчиков температуры и от датчика абсолютного давления 3 поступают в микропроцессорный блок 8, что позволяет в непрерывном режиме корректировать показание газоанализатора при изменении температуры газовых сред и абсолютного давления.

Микропроцессор производит вычисление объемной доли диоксида углерода по измеренному значению объемной доли кислорода, используя выражение:

$$\%CO_2 = \frac{\%CO_2' (20{,}9 - \%O_2)}{20{,}9} \qquad (7.4)$$

а также вычисление коэффициента расхода воздуха согласно выражению:

$$\alpha = \frac{20{,}9}{20{,}9 - \%O_2}, \qquad (7.5)$$

где $\%CO_2'$ - топливный коэффициент CO_2;

$\%O_2$ – измеренное значение объемной доли O_2.

Основные характеристики газоанализаторов такого типа следующие:

- погрешность показаний ±5%;
- питание – никель-кадмиевые аккумуляторы для работы в течение 4 часов или сетевое;
- алфавитно-цифровой ЖКИ-индикатор;
- возможность подключения к высшим ЭВМ/принтер;
- вес до 1,5 кг.

8 АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ВОДЫ, ПАРА И КОНДЕНСАТА

8.1 Общие положения

В теплоэнергетических агрегатах, таких как паровые котлы тепловых станций, котлы утилизаторы промышленных печей, системы испарительного охлаждения металлургических печей и в других, основным теплоносителем является вода. Это связано с тем, что чистая вода имеет ряд преимуществ по сравнению с другими типами теплоносителей (жидкие металлы, газовые среды, жидкие органические вещества и др.): самая высокая теплоемкость, сравнительно низкая температура кипения, нетоксичность и, отсюда, безопасные условия эксплуатации агрегатов, малая агрессивность к конструктивным элементам установок. Однако, основным недостатком воды является хорошая растворимость в ней различных солей, щелочей, кислот и даже газообразных сред, таких как кислород, углекислый газ и другие. Наличие в воде посторонних веществ резко ухудшает ее эксплуатационные характеристики из-за коррозии конструкционных элементов, отложения солей на внутренних поверхностях труб, что в конечном итоге приводит к ухудшению передачи тепла, пережогу труб и преждевременному выходу оборудования из строя.

На предприятиях, где используется вода в качестве теплоносителя, особенно на тепловых электростанциях, производится непрерывный контроль качества питательной воды, пара и конденсата. Контроль водно – химического режима определяет работу установок по химводоочистке воды и позволяет обеспечить безопасную и надежную работу оборудования теплоэнергетического агрегата.

Для осуществления контроля качества воды, пара и конденсата и работы установок очистки воды и конденсата необходимо измерять разнообразные показатели качества отличающихся по химическому составу сред. Эти среды находятся под различным избыточным давлением, имеют различную температуру, отличаются по количеству механических и других примесей. Вследствие этого применяются различные методы и средства анализа состава воды, пара и конденсата. К числу наиболее распространенных методов анализа, применяемых в промышленных анализаторах, относятся разновидности электрохимического оптического и теплового методов. Наибольшее применение получили приборы, основанные на измерении удельной электропро-

водности растворов, в лабораторной практике, при автоматическом химическом контроле водного режима паросиловых установок, при определении эффективности работы установок очистки воды, в промышленных теплообменниках и в других установках.

Измерительные приборы, предназначенные для измерения удельной электропроводности, получили название кондуктометрические анализаторы жидкости. В зависимости от градуировки шкалы вторичного прибора и условий измерений кондуктометрические анализаторы жидкости получили такие названия:

- кондуктометры – применяются в основном в лабораторных условиях и градуируются в единицах «сименс на сантиметр» ($См \cdot см^{-1}$) или «микросименс на сантиметр» ($мкСм \cdot см^{-1}$);
- солемеры – применяются в производственных условиях для измерения показателей качества, характеризующих содержание солей в паре, конденсате и питательной воде паровых котлов, и градуируется по NaCl (на условное содержание в растворе этих солей) в единицах «миллиграмм на килограмм» (мг/кг), «микрограмм на килограмм» (мкг/кг) или «миллиграмм на литр» (мг/л) и «микрограмм на литр» (мкг/л);
- концентратомеры – используются для измерения концентраций растворов солей, кислот, щелочей и градуируются в процентах значения массовой концентрации.

8.2. Электродные кондуктометрические анализаторы

В кондуктометрических анализаторах воды в качестве чувствительного элемента используются два электрода, плоских или цилиндрических, помещенных в водную среду. В зависимости от места установки электродов они разделяются на погружные, проточные и магистральные. Погружные преобразователи опускаются в резервуар с контролируемой жидкостью. Через проточный преобразователь протекает проба анализируемой жидкости, прошедшая в большинстве случаев предварительную подготовку. Магистральные преобразователи вводятся непосредственно в трубопровод, по которому течет анализируемая жидкость.

Погружные преобразователи (рисунок 8.1) применяют в лабораторных кондуктометрах при выполнении измерений повышенной точности. К погружным электродам, выполненных из платины, подводится переменный ток. При использовании постоянного тока происходит поляризации электродов, т.е. на их поверхности собираются

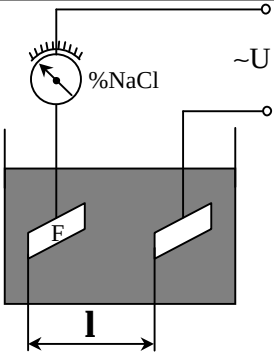


Рисунок 8.1 – Электродный первичный преобразователь

ионы противоположного заряда, что создает внутреннюю противо –ЭДС и увеличение сопротивления раствора.

Измерение концентраций солей в воде (растворе) производится по величине тока I, протекающего через жидкость, и измеряется миллиамперметром, имеющего соответствующую градуировку (%NaCl, мг/л и др.). Ток, протекающий через электроды, определяется электропроводностью раствора, геометрическими параметрами электродов F и расстояния между ними $\mathbf{l}$. Используя закон Ома, можно связать эти величины функциональной зависимостью, т.е.:

$$I = \frac{U}{R}; \qquad R = \frac{\mathbf{l}}{F \cdot \chi}; \; I = \frac{U \cdot \chi \cdot F}{\mathbf{l}}.$$

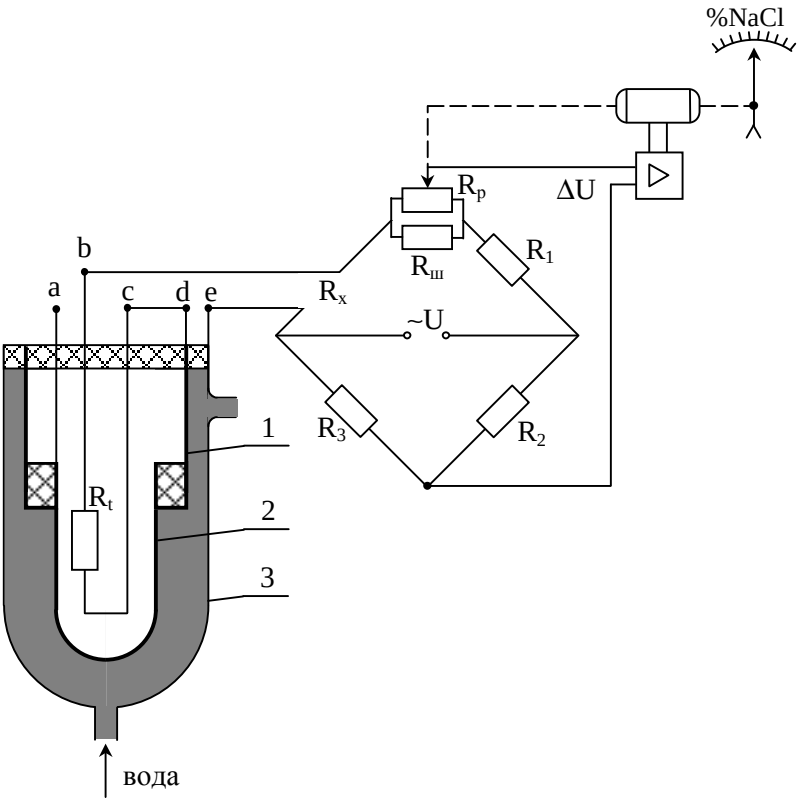
Обозначив соотношение между постоянными величинами через «k», получим формулу, по которой производится градуировка кондуктометра:

$$k = \frac{U \cdot F}{\mathbf{l}}; \quad I = k \cdot \chi. \qquad (8.1)$$

Таким образом, измеряя ток по показанию миллиамперметра, можно определить концентрацию солей в анализируемой жидкости (питательная вода, конденсат пара и др.) При малых концентрациях солей (до 5 %) электропроводность (или удельная электропроводность, См/см) линейно зависит от концентрации этих солей. Так, например, концентрация растворенных веществ, которую приходится определять при контроле качества пара, конденсата, питательной и котловой воды, на несколько порядков меньше 5 %, что способствует повышению точности измерения при постоянстве других параметров. Однако, в конденсате пара и в питательной воде энергетических котлов, кроме небольшого количества солей обычно присутствуют растворенные газы (аммиак NH_3, углекислый газ CO_2) и гидразин N_2H_4. Наличие газов и гидразина изменяет электропроводность конденсата и питательной воды, и в показания кондуктометра необходимо вводить поправки либо предварительно удалять из воды растворенные газы и гидразин. Для более точного определения концентрации солей в воде на электростанциях производят дегазацию путем выпаривания части

жидкости, а также применяют Н-катионитовые фильтры, которые задерживают аммиак и гидразин.

В промышленных условиях для оперативного управления качеством воды чаще применяются проточные и магистральные электродные преобразователи с непрерывной регистрацией показателей качества. Первичные преобразователи кондуктометров могут включаться в различные автоматические измерительные схемы. На рисунке 8.2 представлена наиболее распространенная схема уравновешенного моста, одно из плеч которого является проточным электродным преобразователем кондуктометра. Корпус преобразователя 3 служит одним электродом, вторым электродом являются два изолированных между собой цилиндра 1,2 различного диаметра и высоты. Подключе-



1 – электрод для больших концентраций солей; 2 – электрод для малых концентраций солей; 3 – корпус электродного преобразователя

Рисунок 8.2 – Схема соединения проточного электродного преобразователя с автоматическим мостом

ние электродов 1 или 2 осуществляется в зависимости от содержания солей в воде: при больших концентрациях подключается к электроду 1 (как на рисунке 8.2) и при малых концентрациях производят переключение электрической схемы на электрод 2. Такая конструкция электродного преобразователя позволяет расширить диапазон измеряемой концентрации солей и повысить чувствительность прибора. Внутри цилиндрического электрода 2 находится терморезистор R_t, который компенсирует изменение сопротивления жидкости при изменении ее температуры и исключает влияние этого фактора на показание вторичного прибора. Например, при повышении температуры раствора сопротивление терморезистора возрастает, а раствора, наоборот, уменьшается, что и приводит к компенсирующему эффекту.

Анализируемая жидкость непрерывно прокачивается через проточный кондуктометр и при изменении концентрации солей пропорционально изменяется сопротивление жидкости R_x. При этом, в измерительной диагонали мостовой схемы, питаемой переменным напряжением U, появляется разность потенциалов ΔU. Электронный усилитель, усиливая сигнал ΔU, питает исполнительный механизм, который перемешает движок реохорда R_p и приводит мост в состояние равновесия ($\Delta U=0$). Таким образом, каждому положению движка реохорда соответствует определенное значение электропроводности, т.е. содержание солей в жидкости. Стрелка измерительного прибора, механически связанная с валом исполнительного механизма, укажет на содержание солей в анализируемой жидкости.

Электродными кондуктометрами погружного типа производят измерения электропроводности сетевой, питательной воды и конденсата в диапазоне от 10^{-6} до 1,9 См/см при диапазоне рабочих температур 25±15°С с предельной основной погрешностью ±2,5 %.

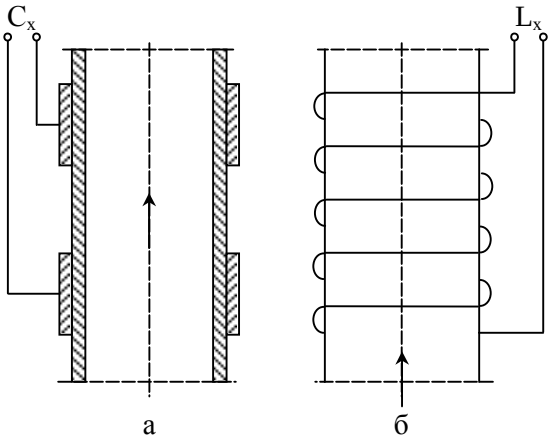
Недостатками электродных кондуктометров являются поляризация и загрязнение электродов продуктами электрохимических реакций, протекающих на их поверхности, а также веществами, находящимися в растворах. На практике поверхности электродов подвергают периодической механической и химической очистке или осуществляют полную замену электродов.

8.3 Безэлектродные кондуктометры

Безэлектродные кондуктометры не контактируют с анализируемой жидкостью и не имеют недостатков, которые имеют электродные кондуктометры, что повышает надежность их работы и увеличивает

точность измерения. Такие приборы получили широкое применение в различных отраслях промышленности для измерения электропроводности водных растворов электролитов. На тепловых и атомных электростанциях безэлектродные кондуктометры используются для контроля концентраций регенерационных растворов кислоты, щелочи и соли, а также для измерения электропроводности химически обессоленой воды. Однако, безэлектродные кондуктометры не используют для контроля качества пара, конденсата турбин и питательной воды паровых котлов из-за меньшей чувствительности по сравнению с электродными кондуктометрами.

В качестве чувствительных элементов в безэлектродных кондуктометрах используют емкостные, индуктивные и трансформаторные преобразователи. Схема емкостного и индуктивного преобразователя представлена на рисунке 8.3. Между концентрацией раствора и выходными величинами преобразователей (C_x – емкостью и L_x - индуктивностью) существует сложная зависимость. Это связано с тем, что помимо природы раствора на выходные величины преобразователей оказывают влияние геометрические параметры и материал самих преобразователей, частота питания и другие факторы. Поэтому градуировочные характеристики определяются экспериментально для конкретного преобразователя и раствора.



а – емкостные преобразователи;
б – индуктивные преобразователи

Рисунок 8.3 – Безэлектродные первичные преобразователи

В качестве вторичных измерительных приборов используются мостовые и резонансные схемы, питаемые от генераторов высокой частоты. В мостовых схемах плечами моста являются конденсаторы, одним из которых является конденсатор емкостного преобразователя (рисунок 8.3 а). При изменении электропроводности анализируемой жидкости изменяется емкость конденсатора C_x первичного преобразователя. Величина возникающего разбаланса моста, пропорциональная теплопро-

водности раствора и усиленная электронным блоком, дает информацию на показывающем и регистрирующем устройстве о концентрации растворенного вещества в воде. В резонансных схемах для измерения величины индукции L_x безэлектродного индуктивного преобразователя используется резонансный контур, частота собственных колебаний которого зависит от индуктивности L_x первичного безэлектродного преобразователя.

Разновидностью безэлектродного индуктивного преобразователя является трансформаторный преобразователь (рисунок 8.4), в котором анализируемый раствор протекает по кольцевой пластмассовой трубе, образующей замкнутый контур.

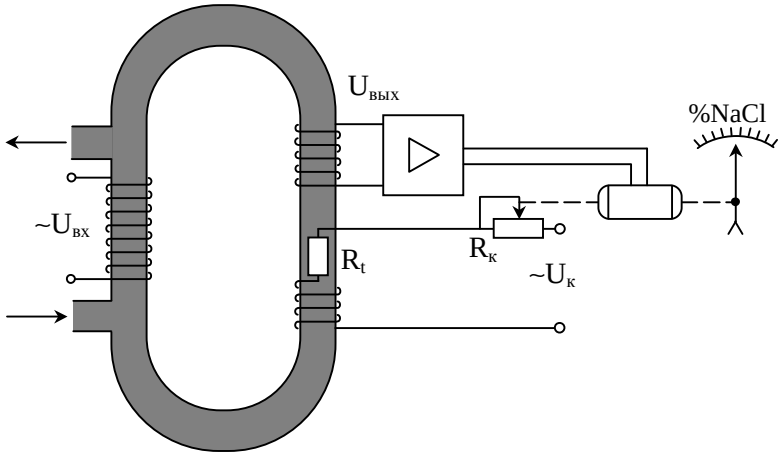


Рисунок 8.4 – Безэлектродный трансформаторный кондуктометр

Трансформаторный преобразователь состоит из первичной обмотки, на которую подается переменное напряжение $U_{вх}$ частотой 50 Гц, вторичной измерительной обмотки, с которой снимается напряжение $U_{вых}$ и компенсационной обмотки, на которую подается компенсационное напряжение $U_к$ частотой 50 Гц. Перечисленные обмотки объединены кольцевым жидким контуром, выполняющим роль сердечника трансформатора.

При изменении концентрации солей (щелочей, кислот и др.) в анализируемой жидкости изменяется переменный магнитный поток в жидком контуре, и выходное напряжение $U_{вых}$ будет однозначно определять содержание солей в жидкости. Для уменьшения влияния колебаний напряжения и частоты питающей сети предусмотрен компенсационный контур, который создает переменный магнитный поток в

жидком контуре, направленный навстречу основному потоку, создаваемому первичной обмоткой. Возрастание компенсационного магнитного потока, управляемого выходным напряжением $U_{вых}$ через усилитель, исполнительный механизм и компенсационное сопротивление , происходит до полной компенсации основного магнитного потока. Величина компенсационного магнитного потока, таким образом, будет определяться положением движка реохорда R_k, которое зависит от значения $U_{вых}$. Стрелка измерительного прибора, кинематически связанная с валом исполнительного механизма, укажет на концентрацию растворенных в воде веществ.

Для автоматической коррекции влияния температуры анализируемой жидкости на показание измерительного прибора кондуктометра используется полупроводниковый компенсационный терморезистор R_t. При увеличении температуры анализируемой жидкости увеличивается степень диссоциации молекул растворенных веществ и увеличивается магнитный поток. Одновременно уменьшается сопротивление терморезистора и возрастает ток в компенсационной цепи, увеличивая компенсационный магнитный поток.

Безэлектродные трансформаторные кондуктометры рассчитаны на диапазон измерения удельной электропроводности 0,01 – 1,0 См/см при допускаемой основной погрешности 2,5 %.

8.4 Потенциометрический метод анализа воды

Потенциометрический метод анализа качества воды и различных растворов основывается на законе Нерста. В отличие от кондуктометров, в которых определяется общая концентрация солей (щелочей кислот и др.), потенциометрические анализаторы определяют концентрацию конкретного иона (конкретного растворенного в воде вещества), а также величину pH раствора. Сущность данного явления состоит в том, что при погружении любого металлического стержня (электрода) в раствор, происходит переход ионов этого металла в раствор из-за значительного (в 81 раз) ослабления связей между атомами. Переход ионов будет происходить до тех пор, пока количество ионов, перешедших в раствор, не будет равно количеству ионов, возвратившихся из раствора на поверхность металла. В результате этого явления на поверхности металла возникает электрический потенциал, зависящий от активной концентрации ионов этого металла в растворе. Измерение поверхностного потенциала электрода позволяет судить о концентрации соответствующих ионов в растворе.

Величина потенциала на поверхности электрода в зависимости от концентрации ионов определяется по уравнению Нерста:

$$E=E_0+RT\frac{\ln a}{n\cdot F}, \qquad (8.2)$$

где E_0 – нормальный потенциал;

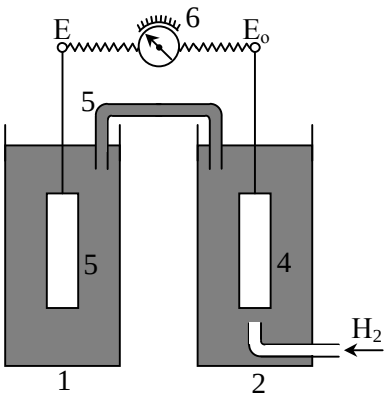
R – газовая постоянная, (8,314 кДж/(кмоль·К));

T – абсолютная температура;

n – заряд ионов;

F – число Фарадея ($9{,}65\cdot10^4 \frac{Кл}{моль}$).

Для измерения поверхностного потенциала E необходимо замкнуть электрическую цепь, вводя в раствор второй электрод, называемый электродом сравнения. Потенциал этого электрода должен оставаться постоянным в процессе измерения. В качестве электрода сравнения используется пластина из платины, погруженная в раствор с активной концентрацией ионов водорода, равной единице при нормальном давлении и температуре. На рисунке 8.5 представлена схема измерения концентрации конкретного иона в растворе с использованием ячейки сравнения. В измерительной ячейке 1 с анализируемым раствором расположен специальный (селективный) электрод 3, который предназначен для определения концентрации определенного компонента. В ячейке сравнения 2 платиновый электрод помещен в раствор, через который пропускается водород под давлением. Две ячейки электрически связаны между собой перемычкой с жидким электролитом 5.



1 – измерительная ячейка; 2 – ячейка сравнения; 3 – селективный электрод; 4 – платиновый электрод; 5 – перемычка; 6 – измерительный прибор

Рисунок 8.5 – Схема потенциометрического анализатора раствора

Разность потенциалов между двумя электродами $\Delta E=E-E_0$ согласно закона Нернста однозначно определяется концентрацией анализируемого компонента, растворенного в воде. Область применения потенциометрических методов измерения концентрации определенных ионов в многокомпонентных растворах значи-

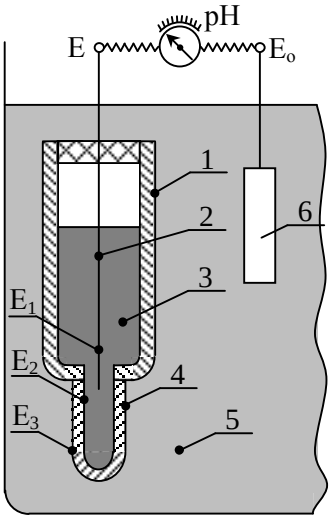
тельно расширилась благодаря созданию новых ионоселективных электродов, обладающих выборным характером действия по отношению к таким катионам и анионам как Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Pb^{2+}, Cl^-, Br^-, I^- и др.

Созданные лабораторные потенциометрические преобразователи, называемые ионометрами, являются универсальными приборами, которые снабжаются комплектом ионоселективных электродов, позволяющими производить измерение концентрации перечисленных выше ионов.

Наиболее широко потенциометрические приборы применяются для измерения активной концентрации ионов водорода в растворах, т.е. для определения pH растворов. При растворении в воде кислот повышается концентрация ионов водорода и величина pH снижается, а при растворении щелочи концентрации ионов водорода снижается и pH растет. Чистая вода, как нейтральное вещество, имеет значение pH=7. Таким образом, отклонение числа pH в водных растворах от 7 в ту или другую сторону характеризует меру их кислотных или щелочных свойств. При эксплуатации паровых котлов тепловых электростанций постоянно контролируется величина pH питательной воды, значение которой должно быть на уровне 9,1±0,1. В качестве корректирующих добавок в питательную воду вводится аммиак, количество которого можно определить по показаниям pH – метров.

Для измерения pH в лабораторных и промышленных условиях используются стеклянные рабочие электроды, которые отличаются широким диапазоном анализируемых сред, высокими метрологическими характеристиками и простотой конструкции. В стеклянных электродах водородными функциями обладает чувствительная тонкостенная мембрана, выполненная из литиевого или натриевого стекла. Водородные функции мембраны объясняются тем, что происходит замещение ионов щелочных металлов (Na, Li), находящихся внутри силикатной решетки стекла, более подвижными ионами водорода.

Один из вариантов стеклянного рабочего электрода, применяемого для определения pH растворов в промышленных условиях (в частности на тепловых электростанциях), представлен на рисунке 8.6. Электрод выполнен из толстостенной стеклянной трубки 1, к концу которой припаяна чувствительная мембрана из литиевого стекла 4. На внешней поверхности мембраны при погружении ее в анализируемый раствор 5 развивается потенциал E_3, зависящий от активной концентрации ионов водорода. Внутри стеклянного электрода находится раствор кислоты 3 постоянной концентрации, который замыкает электри-



1 – контактный электрод;
2 – стеклянная трубка; 3 – раствор кислоты; 4 – мембрана;
5 – анализируемый раствор;
6 – вспомогательный электрод
Рисунок 8.6 – Схема рабочего стеклянного электрода

ческую цепь между мембраной 4 и контактным электродом 2. Потенциалы E_1 (на контактном электроде) и E_2 (на внутренней поверхности мембраны) остаются постоянными при постоянной температуре раствора.

В качестве вспомогательных (сравнительных) электродов чаще всего используют погружной хлорсеребрянный электрод, внутри которого находится серебрянная проволока (электрод), погруженный в 3,5 нормальный раствор KCl, содержащий кристаллы хлористого серебра. Электрический потенциал E_0, развиваемый вспомогательным электродом, составляет 12 мВ. Выводные контакты с потенциалами E и E_0 рабочего и вспомогательного электродов (ячеек) подключаются к вторичному измерительному прибору, имеющему градуировку в единицах pH.

Эксплуатируемые в промышленности pH – метры работают в комплекте с автоматическими потенциометрами и имеют пять диапазонов измерения числа pH: 1; 2,5; 10; 15. Предельная допустимая погрешность pH – метров составляет ±1,0% диапазона измерения.

Широкое распространение pH – метры получили на тепловых электростанциях для контроля кислотно-щелочных характеристик питательной воды паровых котлов.

8.5 Измерение концентрации газов, содержащихся в воде и паре

Растворенные в воде газы и присутствующие в паре, такие как кислород, углекислый газ, водород и другие оказывают вредное влияние на работу технологического оборудования, которое контактирует с водой и паром. Наибольшую опасность представляет кислород, который вызывает коррозию металла внутренних поверхностей водяных и паровых трактов различных промышленных и лабораторных установок.

Полное удаление всех газов из воды и пара требует больших за-

трат, как энергетических так и материальных в виде химических реагентов, что экономически нецелесообразно. Поэтому, для каждого типа технологического агрегата устанавливаются регламентные нормы концентрации отдельных компонентов газовой среды в воде и паре Так, например, для энергетических паровых котлов содержание растворенного кислорода в питательной воде должно составлять 7 – 10 мкг/кг.

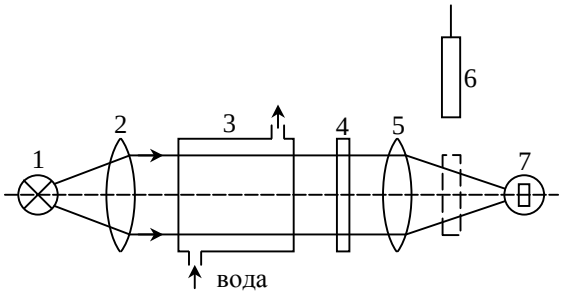
Повышение надежности эксплуатации технологического оборудования может быть обеспечено непрерывным или периодическим контролем и автоматическим регулированием содержания растворенного в воде кислорода. В зависимости от концентрации кислорода в воде используются фотоколориметрические, электрохимические и кондуктометрические методы.

Фотоколориметрические методы основаны на измерении прозрачности (оптической плотности) анализируемой воды, интенсивность окраски которой зависит от концентрации в воде кислорода. Окрашивание воды производится специальными химическими реактивами, которые изменяют свой цвет при взаимодействии с растворенным кислородом. Измерение интенсивности окрашивания воды производится специальными химическими реактивами, которые изменяют свой цвет при взаимодействии с растворенным кислородом.

Измерение интенсивности окрашивания воды производится в фотоколориметрических анализаторах, в которых осуществляется преобразование измеряемой величины (кислородосодержания) в изменение электрического сопротивления фоторезистора (рисунок 8.7). Анализируемая вода набирается в специальную кювету 5, в которую автоматически вводится определенный объем реактива. Степень ослабления светового потока, проходящего через кювету от источника 1, зависит от интенсивности окраски воды, которая определяется концентрацией растворенного кислорода. Световой поток, падающий на фоторезистор 7, а следовательно, и электрическое сопротивление его находится в однозначной зависимости от измеряемой величины – содержания растворенного кислорода в воде. Фоторезистор включен в мостовую схему автоматического моста, шкала измерительного прибора которого отградуирована в единицах массовой концентрации, мг/кг, мкг/кг.

Фотоколориметрические анализаторы кислорода являются приборами дискретного действия, что является основным недостатком приборов этого типа. Однако перевод приборов на непрерывный режим усложняет их конструкцию и резко увеличивает расход реагентов для окрашивания воды.

Наибольшее распространение на тепловых электростанциях



1 – источник света; 2, 5 – линзы; 3 – рабочая камера; 4 – светофильтр; 6 – контрольный светофильтр; 7 – фоторезистор

Рисунок 8.7 – Схема фотоколориметрического анализатора кислорода в воде

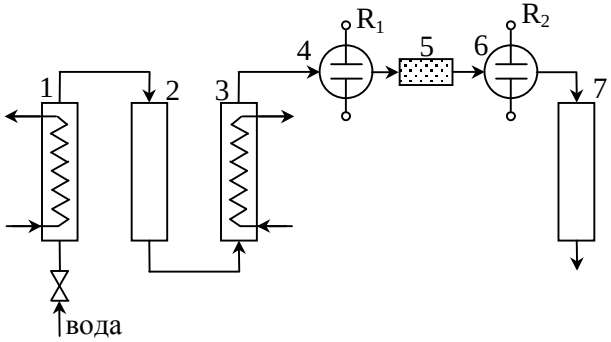
получили кондуктометрические кислородомеры для определения микроконцентраций растворенного в воде кислорода. Действие кондуктометрических анализаторов основано на использовании химических реакций с каким – либо реагентом, сопровождающихся изменением электропроводности анализируемой воды. Основное требование к реагенту – он должен быстро и полно реагировать с растворенным в воде кислородом с образованием сильного электролита и не вступать в реакции с водой и ее примесями.

Из многих опробованных реагентов в наибольшей степени приведенным выше условиям удовлетворяет металлический талий (Tl). Однако, следует отметить основной недостаток таллия – токсичность как самого металла, так и его соединений.

Принципиальная схема кондуметрического анализатора для измерения микроконцентраций растворенного в воде кислорода приведена на рисунке 8.8. Проба анализируемой воды пропускается через термостат – холодильник 1 и поступает на фильтр 2 для обессоливания воды, заполненный ионообменными смолами. Обессоленная проба пропускается через дополнительный холодильник 3 и кондуктометрический преобразователь 4 для измерения начальной электропроводности воды и далее в патрон 5 из полиэтилена, заполненный мелкодисперсным металлическим таллием. В патроне происходит химическая реакция взаимодействия таллия с кислородом.

$$H_2O+2Tl+0{,}5\cdot O_2=2TlOH$$

Образовавшаяся гидроокись таллия TlOH хорошо растворяется в воде и является сильным электролитом, при этом электропроводность раствора повышается пропорционально содержанию растворенного в воде кислорода. Изменение электропроводности воды после таллиевого патрона фиксируется кондуктометрическим преобразователем 6. Для очистки воды от токсичных продуктов реакции на выходе прибора установлен фильтр 7.



1, 3 – холодильники; 2 – фильтр для обессоливания воды; 4, 6 – электродные преобразователи; 5 – патрон с таллием; 7 - фильтр
Рисунок 8.8 – Схема кондуктометрического преобразователя для измерения кислорода в воде

Измерительная схема кислородомера представляет собой мост, в котором сопротивления R_1 и R_2 кондуктометрических преобразователей 4 и 6 включены в противоположные плечи моста. При таком соединении изменение электропроводности исходной воды, влияя на сопротивление обоих преобразователей 4 и 6, не вызывает изменение небаланса моста. Изменение концентрации кислорода в анализируемой воде приводит к изменению сопротивления R_2 преобразователя 6. Возникший разбаланс моста, пропорциональный концентрации кислорода, усиливается усилителем, затем преобразуется в выходной сигнал постоянного тока 0 – 5 мА и измеряется автоматическим миллиамперметром.

Кондуктометрический анализатор выпускается класса точности 6 с диапазоном измерения 0-30 мкг/л O_2.

Кондуктометрический метод используется также для определения содержания водорода в питательной воде и пара паровых котлов на тепловых электростанциях. Появление водорода в пароводяном тракте котла и величина его концентрации характеризует интенсивность протекания процесса коррозии металла внутренних поверхностей труб. Скорость коррозии металла зависит от водного и температурного режима эксплуатации парового котла. Непрерывный автоматический контроль за водородом в воде и паре позволяет оперативно вмешиваться в работу котельной установки и устанавливать оптимальные режимы работы котла.

Используемые на тепловых электростанциях водородомеры осно-

ваны на измерении теплопроводности газовой смеси, в которой находится водород. В отличии от многих газов, таких как N_2, CO_2, CO, CH_4, O_2 и других, теплопроводность водорода в 5 – 7 раз выше, что позволяет с достаточной точностью определять концентрацию водорода в газовой смеси. Для выделения водорода из анализируемой смеси (конденсата) ее пропускают через кислородную атмосферу. При этом, чем больше водорода содержится в воде, тем большее количество его будет выделяться в окружающую кислородную среду. Таким образом, по концентрации водорода в кислородной среде можно судить о содержании водорода, растворенного в воде (конденсате пара). Приборы, основанные на измерении теплопроводности газовой смеси, получили название термокондуктометрическими анализаторами.

Анализатор состоит из следующих устройств и элементов (рисунок 8.9): неуравновешенного моста с манганиновыми резисторами R_1, R_0, R_2 и платиновыми резисторами R_3, R_4; стабилизированного источника питания ИПС; измерительного прибора ИП; электролизера Эл, заполненного водным раствором едкого калия, для получения чистого кислорода; приемной колонки ПК, в которую поступает контролируемая проба воды или конденсата пара. Чувствительный элемент (резистор) R_3 помещен в герметически закрытую камеру, заполненную чистым кислородом (сравнительным газом). Чувствительный элемент (резистор) R_4 помещен в рабочую камеру, которая соединена с верхней частью приемной колонки.

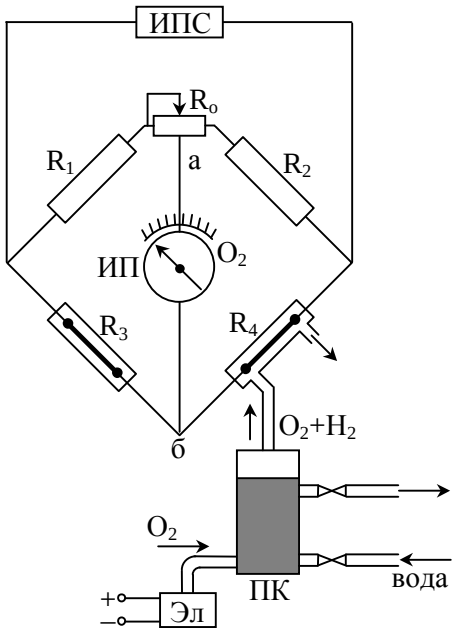


Рисунок 8.9 – Схема термокондуктометрического анализатора для измерения водорода в воде или паре

Кислород из электролизера непрерывно подается в приемную колонку ПК. Одновременно в эту колонку поступает анализируемая проба конденсата или воды, при этом конденсат (вода) соприкасается с газообразным ки-

слородом и выделяет растворенный водород. Газовая смесь, состоящая из кислорода и водорода, поступает в рабочую камеру с чувствительным элементом (резистором) R_4. Наличие водорода в рабочей камере резко увеличивает теплоотдачу от нагретой до 100 °С платиновой проволоки к стенкам камеры за счет увеличения теплопроводности газового слоя. Температура чувствительного элемента R_4 понижается, а следовательно, уменьшается его сопротивление. При этом, на вершинах измерительной диагонали моста из-за нарушения его равновесия появится напряжение, величина которого будет определяться концентрацией водорода в газовой смеси. Измерительный прибор, установленный в газовой диагонали моста, укажет содержание водорода в питательной воде (конденсате).

Для снижения влияния температуры стенок камеры на показания измерительного прибора служит плечо сравнения R_3, аналогичное R_4 и находящееся в камере, заполненной кислородом, а переменный резистор R_0 служит для начальной балансировки моста (для установки стрелки измерительного прибора в нулевое положение).

Шкалу вторичного прибора анализаторов, применяемых для определения растворенного в воде и паре водорода, градуируют в микрограммах на литр (мкг/л) или в микрограммах на кг (мкг/кг). Диапазон измерения водородомера составляет 0 – 20 и 0 – 200 мкг/кг H_2, предельная погрешность не превышает ±6%.

9 ИЗМЕРЕНИЕ ВЛАЖНОСТИ ГАЗОВ

9.1 Общие положения

Водяные пары, содержащиеся в некоторых газах, являются нежелательным компонентом. Так, избыточное количество водяных паров в газообразном топливе приводит к уменьшению теплоты сгорания газа, что снижает температуру в топочном пространстве агрегата. Содержащаяся в продуктах сгорания влага вызывает коррозию конструктивных элементов газоотводящих трактов и ухудшает работу дымовой трубы. В таких газах, как защитные атмосферы, используемые при проведения специальных видов термообработки и в других технологических операциях, влага должна практически отсутствовать. В доменных печах горячее воздушное дутье должно содержать определенное количество водяных паров в целях стабилизации хода доменной плавки.

Приведенные примеры показывают, что постоянный или периодический контроль содержания водяных паров в различных газах позволяет обеспечивать оптимальный технологический режим в различных агрегатах.

Содержание водяных паров в газах выражается абсолютной или относительной влажностью.

Абсолютная влажность показывает весовое содержание водяных паров в одном кубометре влажного или сухого газа при нормальных условиях. Пересчет абсолютной влажности, отнесенной к сухому и влажному газу, производится по формуле:

$$f = \frac{f_o}{1 + (f / 804)}, \qquad (9.1)$$

где f – содержание водяных паров, отнесенное к влажному газу, г/м^3;

f_o – содержание водяных паров, отнесенное к сухому газу, г/м^3;

804 – плотность водяных паров при 0°С и 101,325 кПа, г/м^3.

Относительная влажность показывает отношение водяных паров, содержащихся в 1 м^3 газовой смеси, к максимально возможному содержанию водяных паров, соответствующее состоянию насыщения при той же температуре. Относительная влажность выражается в от-

носительных единицах или в процентах и определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{f}{f_н} 100 , \% \qquad (9.2)$$

где f – текущее содержание водяных паров в газе, г/м^3;

$f_н$ – максимально возможное содержание водяных паров в газе в состоянии насыщения при данной температуре, г/м^3.

Относительная влажность может быть выражена через парциальные давления водяных паров по формуле:

$$\varepsilon = \frac{P_п}{P_{п.н.}} 100 , \% \qquad (9.3)$$

где $P_п$ – текущее значение парциального давления водяных паров в газе, Па;

$P_{п.н}$ – парциальное давление водяных паров в газе при насыщении его паром, Па.

В производственных условиях влажность газов часто выражают температурой точки росы, представляющей собой температуру, при которой газ насыщен парами воды и избыточная влага выпадает в виде капелек воды на окружающих поверхностях. Влияние температуры на парциальное давление и содержание водяных паров в состоянии насыщения показано в таблице 9.1.

Таблица 9.1 – Парциальное давление и абсолютная влажность газовой среды в состоянии насыщения

t, °C	–40	–30	–20	–10	0	10	20	30	40
$P_{п.н}$, кПа	0,013	0,038	0,102	0,260	0,611	1,227	2,370	4,241	7,375
$f_н$, г/м^3 сух.	0,10	0,28	0,81	2,1	4,8	9,8	18,9	35,1	63,1

Если давление влажного газа отличается от нормального (101,325 кПа), то производится перерасчет значения $f_н$, приведенное в таблице 9.1, по формуле:

$$f = f_н \frac{101{,}325 - P_{п.н.}}{P - P_{п.н.}} , \qquad (9.4)$$

где P – абсолютное давление анализируемого газа, кПа.

Для измерения абсолютной и относительной влажности используются различные методы, основными из которых являются: психрометрический, конденсационный (метод точки росы) и сорбционный методы.

9.2 Психрометрический метод

Измерение влажности приборами, получившими название "психрометры", основано на измерение температуры газовой среды двумя термометрами, один из которых находится во влажной среде, например, обернут влажной тканью. Два термометра, сухой и влажный, будут иметь разные показания, т.к. произойдет понижение температуры влажного термометра в результате затраты тепла на испарение жидкости в окружающую среду (в анализируемый газ). Чем ниже влажность окружающей среды, тем интенсивнее идет испарение влаги с поверхности мокрого термометра. Следовательно, разница в показаниях сухого и мокрого термометров будет тем больше, чем ниже влажность анализируемого газа. По разности температур и температуре сухого термометра с помощью таблиц или номограмм определяется влажность газа. На рисунке 9.1 приведена номограмма для определения абсолютной влажности по показаниям температуры сухого термометра и разности температур сухого и влажного термометров. Относительная влажность рассчитывается по формуле (9.2), в которой абсолютная влажность (текущее содержание водяных паров в газе) f определяется по номограмме (рисунок 9.1), а максимально возможное количество водяных паров $f_н$ по температуре сухого термометра по справочным таблицам.

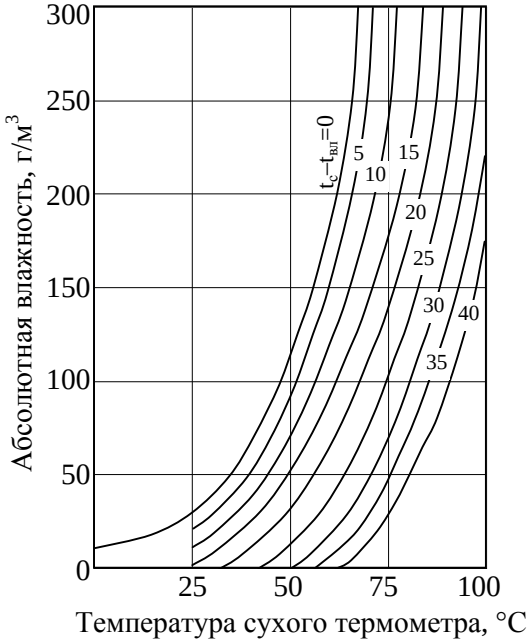
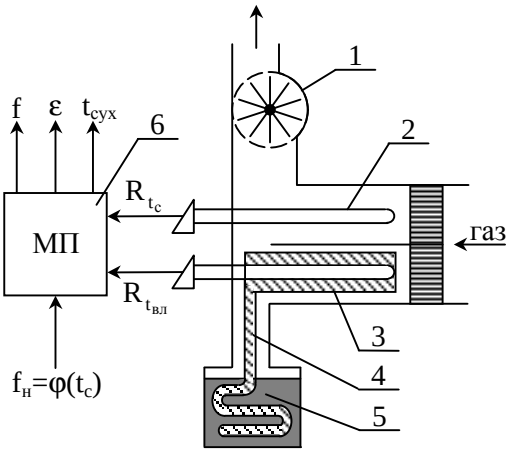


Рисунок 9.1 – Номограмма для определения влажности газов

Психрометрический метод измерения влажности газовых сред реализован в приборах различной конструкции от переносных до автоматических. На рисунке 9.2 представлена схема автоматического психрометра, в котором использовано микропроцессорное устройство для обработки и получения информации об абсолютной и относительной



1 – вентилятор; 2 – "сухой" термометр; 3 – "мокрый" термометр; 4 – влажная ткань; 5 – сосуд с водой; 6 – микропроцессор

Рисунок 9.2 - Психрометр

влажности газовой среды.

Прибор состоит из рабочей камеры, разделенной на две половины, в каждой из которых расположены термометры сопротивления. Один из термометров (сухой термометр) определяет действительную температуру газовой среды, t_c. Второй термометр (чувствительная его часть) обернут влажным гигроскопическим материалом.

Анализируемая газовая среда непрерывно прокачивается через газовые камеры за счет разряжения, создаваемого вентилятором 1. Информация о разности температур между «сухим» и «мокрым» термометром поступает в микропроцессор (МП), в котором производится решение двух уравнений:

$$f=f_{нас}-A\cdot(t_{сух}-t_{вл}); \qquad \varepsilon=\frac{f}{f_{нас}}\cdot 100\%, \qquad (9.5)$$

где f – текущее значение влажности анализируемой газовой среды, г/м^3;

$f_{нас}$ – значение абсолютной влажности газа в состоянии насыщения при данной температуре ($t_{сух}$), г/м^3;

A – постоянная прибора (психрометра).

В блок памяти микропроцессора вводятся табличные данные $f_{нас}$ при различной температуре газовой среды, т.е. $f_{нас}=\varphi(t_{сух})$, и постоянная прибора A.

Микропроцессор выдает следующие данные: абсолютную влажность f, относительную влажность ε и температуру газовой среды $t_{сух}$.

9.3 Конденсационный метод измерения влажности

Конденсационный метод или метод точки росы основан на измерении температуры гладкой металлической поверхности в момент выпадения на ней конденсата, т.е. в момент, когда водяной пар, содержащийся в газе, достигает насыщения. Для получения конденсата произ-

водится постепенное охлаждение металлической пластинки с обратной стороны холодной водой или специальным хладагентом до температуры точки росы ($t_{т.р.}$). При известной начальной температуре газовой среды ($t_г$) и температуре точки росы ($t_{т.р.}$) можно определить абсолютную и относительную влажность, используя табличные данные по давлению и плотности насыщенных паров воды (Приложение К).

Пример 9.1. Определить абсолютную и относительную влажность воздуха, если температура воздуха равна +25°С, а температура точки росы составила +5°С.

Решение. Используя табличные данные, определим абсолютную влажность по температуре токи росы: f=6,8 г/м^3.

Определим максимальное количество водяных паров, которое может содержаться в воздухе в состоянии насыщения при температуре воздуха +25°С, по табличным данным: $f_{макс}$=23,1 г/м^3.

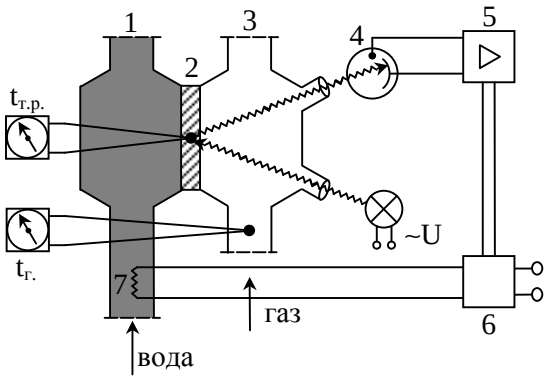
Относительная влажность определится отношением:

$$\varepsilon = \frac{f}{f_{макс}} 100\% = \frac{6,8}{23,1} 100\% = 29,4\% .$$

Для определения влажности газовых сред (воздуха, горючих газов, технологических газов и других газовых сред) используются влагомеры, в которых момент появления росы на металлической пластинке фиксируется визуально или автоматически.

На рисунке 9.3 показана схема прибора, в котором непрерывно автоматически поддерживается температура точки росы. Прибор состоит из двух сочлененных между собой камер: холодильной 1 и газовой 3. Между камерами располагается металлическая пластинка 2 с зеркальной поверхностью на газовой стороне.

Через камеры непрерывно прокачивается охлажденная вода и анализируемый газ. При постепенном снижении температуры металлической пластинки 2 на ее зеркальной поверхности при определенной температуре появятся капельки воды (роса) из охлажденного газа. При этом резко уменьшится освещенность фотоэлемента 4, а на выходе усилителя 5 электрический сигнал будет равен нулю и реле 6 включит нагреватель 7, расположенный в холодильной камере. Повышение температуры воды приведет к увеличению температуры пластинки и к испарению влаги. Появившийся сигнал на выходе усилителя, отключит через реле нагреватель и при этом снова начнется процесс охлаждения пластинки до появления росы. Таким образом, система автоматически будет поддерживать температуру пластинки близкой к температуре точки росы. Установленный в металлической пластинке чувст-



1 – холодильная камера; 2 – металлическая пластинка; 3 – газовая камера; 4 – фотоэлемент; 5 – электронный усилитель; 6 – реле; 7 - нагреватель

Рисунок 9.3 – Конденсационный влагомер

вительный элемент (например, термистор) покажет на вторичном приборе небольшие колебания температуры вокруг температуры точки росы.

Приборы для измерения влажности, основанные на измерении точки росы, отличаются большой точностью и могут применяться в промышленных объектах, где необходимо непрерывно измерять влажность технологических газов.

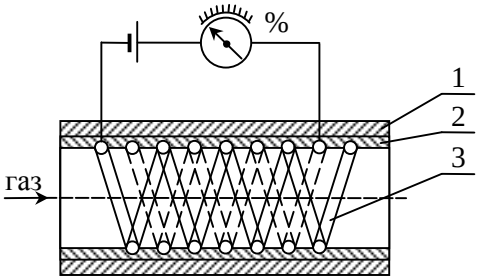
Дальнейшее усовершенствование конденсационного метода измерения влажности связано с применением микропроцессорного блока, в память которого введены табличные данные по содержанию водных паров в газовой среде в состоянии насыщения при различной температуре.

9.4 Сорбционный метод измерения влажности

В этом методе используется свойство некоторых веществ поглощать влагу из анализируемого газа и изменять свои электрические характеристики в зависимости от содержания влаги в газе.

Сорбционный метод измерения влажности используется в кулонометрических и электрических влагомерах. На рисунке 9.4 показана схема кулонометрического влагомера, основанного на измерении тока электролиза той воды, которая образуется при поглощении сорбентом из анализируемого газа.

Датчик прибора представляет собой цилиндрическую трубку 1 небольшого диаметра, на внутренней поверхности которой размещены два спиральных платиновых электрода 3. Электроды располагаются в тонком слое фосфорного ангидрида 2. В сухом виде фосфорный ангидрид имеет большое электрическое сопротивление, а при насыщении влагой сопротивление резко падает.



1 – трубка; 2 – пленка P_2O_5;
3 – платиновый электрод

Рисунок 9.4 – Кулонометрический влагомер

Анализируемый газ с постоянной скоростью пропускают через трубку датчика. Если в газе имеется влага, то она поглощается фосфорным ангидридом с образованием фосфорной кислорты по реакции:

$$P_2O_5+H_2O\rightarrow 2HPO_3$$

Под воздействием напряжения, приложенного к электродам, происходит электролиз фосфорной кислоты по реакции:

$$2HPO_3\rightarrow P_2O_5+H+0{,}5O_2.$$

В установившемся равновесии количество поглощенной влаги в единицу времени равно количеству удаленной. Чем больше влаги в анализируемом газе, тем больше ток электролиза, который является мерой концентрации влаги.

Кулонометрические влагомеры предназначены для измерения микроконцентраций влаги в газах от 10^{-4} % до 1 % в объемных единицах с погрешностью ±(5 - 10)%.

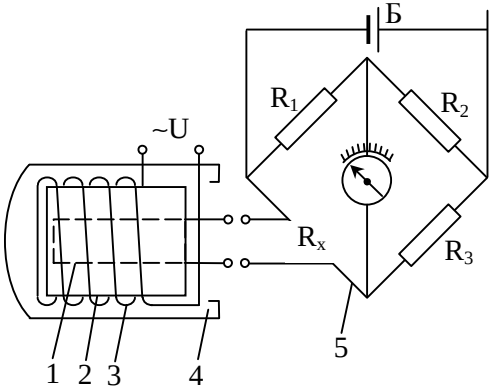
В промышленных условиях при определении концентрации водяных паров в газовых средах повышенной влажности применяются электролитические не подогреваемые и подогреваемые датчики.

Неподогреваемые датчики имеют чувствительный элемент, выполненный из гигроскопического материала, например, влагосорбирующей пленки из окиси алюминия. Внутри материала располагаются два электрода, которые связаны с мостовой электрической схемой. При изменении влажности анализируемого газа изменяется электропроводность слоя гигроскопического материала, находящегося между двумя электродами. Величина электрического сопротивления материала является мерой концентрации влаги в анализируемом газе.

Принцип действия подогреваемых датчиков основан на измерении температуры гигроскопического материала в тот момент, когда давление водяных паров над поверхностью насыщенного раствора гигроскопической соли хлористого лития уравновешивается давлением водяных паров измеряемой газовой среды.

Подогреваемый датчик (рисунок 9.5) представляет собой терморезистор 1, на котором находится слой стеклоткани 2, пропитанный

раствором хлористого лития. На слое стеклоткани располагается нагреватель 3 из платиновой или серебряной проволоки. Датчик помещен в колпачок 4 из нержавеющей стали.



1 – терморезистор; 2 – стеклоткань; 3 – электронагреватель; 4 – колпачок; 5 – измерительный прибор

Рисунок 9.5 – Схема электролитического влагомера с подогреваемым датчиком

В датчике постоянно протекают два процесса, оказывающих противоположное влияние: испарение влаги из пропитанной раствором хлористого лития стеклоткани за счет тепла нагревателя и поглощение влаги вследствие гигроскопичности соли.

Равновесие наступает, когда парциальное давление водяного пара в анализируемом газе (в котором находится датчик) уравняется с парциальным давлением водяного пара над насыщенным раствором хлористого лития.

Температура датчика, при которой устанавливается равновесие давлений паров воды, однозначно связана с влажностью анализируемого газа, т.е. с температурой точки росы. Установившаяся температура внутри датчика в момент равновесия парциальных давлений водяного пара измеряется терморезистором, включенного в схему измерительного моста 5. Точка росы в подогреваемых гигрометрах отсчитывается от –45 до +60°С. Подогреваемые датчики имеют стабильную зависимость R=f(t), поэтому обладают хорошей взаимозаменяемостью, их погрешность не превышает 2%.

10 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

10.1 Общие сведения

Усложнение технологических объектов и увеличение объема информации привело к необходимости измерять или контролировать одновременно сотни физических величин. Так, например, система контроля и управления энергоблоком 800 МВт на тепловой электростанции включает в себя более 1600 контролируемых параметров, свыше 1000 регулирующих блоков, 120 локальных контуров регулирования.

Переработка больших объемов информации, увеличение площади щитов, занятых вторичными приборами, локальными регуляторами и защитно - сигнализирующими устройствами, при физиологической ограниченности возможностей человека в переработке больших объемов информации привела к возникновению такого вида средств измерений, как измерительные информационные системы (ИИС).

По функциональному назначению ИИС делят на:

- измерительные системы;
- системы автоматического контроля;
- системы технической диагностики;
- измерительно-вычислительные комплексы.

По организации алгоритма функционирования ИИС различают:

- системы с жестким, заранее заданным алгоритмом функционирования;
- программируемые системы;
- адаптивные системы.

В системах с жестким алгоритмом функционирования алгоритм работы ИИС не меняется, и такая система может применяться в объектах работающих в определенном режиме. В программируемых системах алгоритм работы изменяется в соответствии с заранее заданной программой, которая составляется в зависимости от условий функционирования объекта исследования. В адаптивных системах алгоритм работы изменяется, приспосабливаясь к изменениям измеряемых величин и условий работы объекта. Для адаптивных систем требуется меньшее количество предварительной информации, чем для систем с

жестким алгоритмом функционирования, что имеет большое значение для новых объектов, характеристики которых мало известны.

Основными функциями ИИС являются:

- получение измерительной информации от объекта:
- обработка измерительной информации;
- представление информации оператору или ЭВМ;
- формирование управляющих воздействий на объект.

На рисунке 10.1 представлена обобщенная структурная схема ИИС, содержащая следующие устройства:

- устройства измерения, включающие в себя первичные и вторичные измерительные преобразователи и собственно измерительное устройство, выполняющее операцию сравнения с мерой;
- устройство обработки измерительной информации, выполняющее обработку измерительной информации по определенному алгоритму;
- устройство хранения информации;
- устройство представления информации в цифровом виде;
- устройство управления, служащее для организации взаимодействия между объектом и другими устройствами ;
- устройство воздействия на объект.

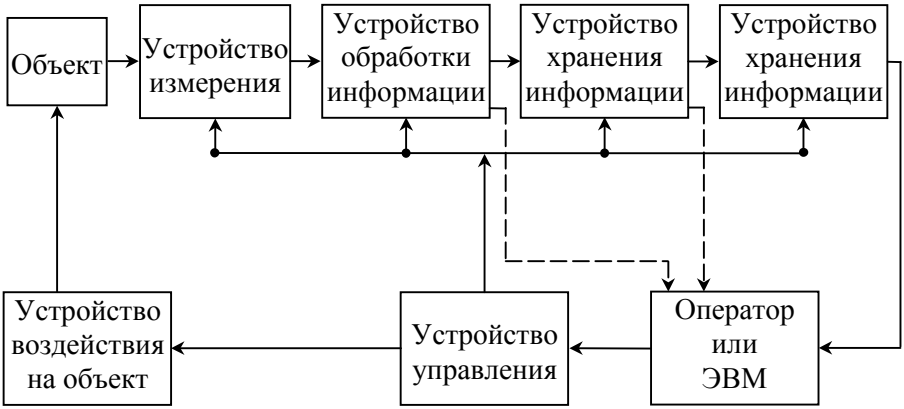


Рисунок 10.1 – Структурная схема измерительной информационной системы

Информация от ИИС может выдаваться оператору или поступать в ЭВМ. Оператор ЭВМ может воздействовать на устройство управления ИИС, меняя соответственно программу ее работы. При наличии в

составе ИИС ЭВМ информации к ЭВМ может поступать непосредственно от устройств обработки или хранения (пунктирные линии на рисунке 10.1).

В существующих ИИС с помощью ЭВМ производится также расчет технико-экономических показателей объекта, осуществляется контроль нахождения тех или иных параметров в заданных пределах, ведется по определенным алгоритмам обработка измерительной информации с целью диагностики технических ситуаций и анализа состояния объекта и его элементов, производится регистрация аварийных ситуаций.

Физические величины, измеряемые и контролируемые с помощью ИИС, отличаются большим разнообразием. Для того, чтобы ИИС были универсальными, т.е. пригодными для измерения и контроля разнообразных величин, необходимо, чтобы они были представлены унифицированными электрическими сигналами.

В ИИС применяют следующие унифицированные сигналы:

- непрерывные сигналы в виде постоянных и переменных токов и напряжений, параметры которых являются информативными параметрами. Диапазоны измерения параметров некоторых непрерывных унифицированных сигналов нормированы государственными стандартами. Эти сигналы называют нормативными. Приведение (нормирование) параметров сигналов к определенному уровню осуществляется так называемыми нормирующими измерительными преобразователями;
- импульсные сигналы в виде серии импульсов постоянного тока, параметры которых (амплитуда, частота, длительность импульсов) являются информативными параметрами;
- кодово-импульсные сигналы, например, в виде импульсов постоянного тока или напряжения, комбинации которых передают значения кодированых измеряемых величин.

Применение тех или иных унифицированных сигналов зависит от требуемых характеристик ИИС, вида канала связи, формы представления измерительной информации (аналоговая или цифровая), используемой элементарной базы и др.

10.2 Измерительные системы

К измерительным системам относят системы, в которых преобладает функция измерения, а функции обработки и хранения незначительны или отсутствуют совсем. На вход измерительной системы поступает множество величин, изменяющихся во времени и распределенных в пространстве, а на выходе получают результаты измерений в виде именованных чисел или отношений измеряемых величин.

Для всех измерительных систем основной для построения является наличие воспринимающих элементов – первичных измерительных преобразователей (датчиков), элементов сравнения, мер и элементов выдачи результата. В зависимости от вида и числа различных элементов в структуре измерительных систем их делят на многокомпонентные, сканирующие, мультипликационные и многоточечные.

Многоканальные измерительные системы представляют собой один из самых распространенных видов и содержат полный набор элементов (от датчиков до выдачи результатов). Такие системы обладают наиболее высокой надежностью, наиболее высоким быстродействием и возможностью индивидуального подбора средств измерений к измеряемым величинам, что исключает иногда необходимость унификации сигналов. Недостаток таких систем – повышенная сложность и стоимость.

Сканирующие измерительные системы выполняют последовательно во времени измерения множество величин с помощью одного канала измерения и содержат один набор элементов и так называемое сканирующее устройство. Это устройство перемещает датчик, называемый сканирующим датчиком, в пространстве внутри или возле объекта. Траектория движения датчика может быть заранее запрограммирована либо может изменяться в зависимости от полученной в процессе сканирования информации.

Сканирующие измерительные системы применяют в случае, когда измеряемая величина распределена в пространстве, например, поле температур поверхности слитка, поле давлений в рабочем пространстве какого-либо объекта, поле концентраций веществ в объекте и т.д. С помощью сканирующих систем получают количественную оценку значений измеряемых параметров в заданных точках и определяют экстремальные значения параметров. Недостатком измерительных систем является относительно малое быстродействие из-за

последовательного выполнения операций измерения для всех измеряемых величин.

Мультиплицированные измерительные системы или системы с общей мерой позволяют в течение одного цикла измерения известной величины выполнить сравнение ее со всеми известными величинами, т.е. определить (измерить) множество величин без применения коммутирующих узлов. Такие системы чаще всего используются в радиотехнике и электронике и имеют меньшее число элементов по сравнению с другими системами. Недостатком мультиплицированых измерительных систем является большое число элементов сравнения, равное числу измеряемых величин.

Многоточечные измерительные системы применяются в сложных объектах с большим числом измеряемых величин. Число измерительных каналов в таких системах может достигать нескольких тысяч. Многократное последовательное использование отдельных узлов измерительного тракта приводит к последовательно-параллельному принципу действия таких систем и к минимальной сложности. Для переключения отдельных узлов, работающих параллельно и последовательно во времени, применяются измерительные коммутаторы, к которым поступают аналоговые сигналы от всех датчиков, установленных в объекте. Коммутаторы могут быть одноступенчатые и многоступенчатые, а число ступеней коммутации зависит от числа датчиков.

Достоинством многоточечных измерительных систем является меньшее количество оборудования по сравнению с многоканальными системами. Недостатком этих систем является пониженное быстродействие при большом числе опрашиваемых датчиков и некоторое снижение точности за счет дополнительной погрешности в самих коммутирующих устройствах.

10.3 Телеизмерительные системы

В различных областях науки и техники возникает необходимость осуществлять измерения на объектах, находящихся на значительном расстоянии от стационарных средств измерения и последующей обработки (например с помощью ЭВМ) информации. Такая необходимость возникает при измерении параметров объектов, рассредоточенных по площади (несколько районных котельных с общим диспетчерским

пунктом, нефте- и газопромыслы, объекты атомной энергетики и др.). В таких случаях наиболее удобным и экономически целесообразным является применение телеизмерительной системы.

Отличие телеизмерительной системы от измерительной системы ближнего действия заключается в наличии специального канала связи. Под каналом связи понимают совокупность технических средств, необходимых для передачи информации от различных источников. Различают проводные линии связи, радиолинии и оптические линии связи.

Для передачи информации от нескольких источников по одной линии связи применяют различные принципы разделения каналов. Наиболее часто используют временное и частотное разделение каналов.

При временном разделении происходит последовательная передача по линии связи значений нескольких измеряемых величин, а разделение измерительных каналов производится с помощью коммутаторов.

При частотном разделении возможна одновременная передача по линии связи значений нескольких измеряемых величин. Для передачи каждой величины используют определенную полосу частот.

В зависимости от дальности передачи информации, от требуемой точности и других факторов телеметрические системы делят на токовые, частотные, время-импульсные и цифровые.

В токовых системах величина измеряемого параметра передается по проводным линиям связи постоянным током (0 – 5мА), вырабатываемым преобразователем. На принимающей стороне устанавливают измерительные коммутаторы, а принимающие приборы, кроме того, снабжают блоками памяти для хранения показания до очередного подключения коммутатора. Дальность действия токовых систем ограничивается погрешностью, вносимой непостоянством параметров линии связи (сопротивление приборов и изоляции между проводами). Дальность действия токовых телеизмерительных систем составляет 7…20 км по воздушным линиям связи и 20…25 км по кабельным линиям.

В частотных системах величина измеряемого параметра передается по линиям связи частотой синусоидального тока или частотой импульсов постоянного тока. Переданный по линии связи частотный сигнал преобразуется приемником либо в аналоговый сигнал, либо в код для выдачи результата измерения в цифровой форме. В настоящее время частотные системы широко распространены как системы дальнего действия (несколько сотен километров). Число одновременно передаваемых измеряемых величин не превышает 18 из-за возникаю-

щих помех в соседних частотных каналах.

В телеизмерительных системах, использующих время-импульсные сигналы, величина измеряемого параметра передается по линиям связи длительностью импульсов постоянного тока или интервалами между импульсами. На передающей стороне используется измерительный коммутатор и время-импульсный преобразователь, т.е. преобразователь унифицированного напряжения во временный интервал. На принимающей стороне система содержит преобразователь временного сигнала в код, кодовый переключатель, регистры, которые запоминают коды каждого сигнала и узел выдачи результатов. Время-импульсные системы относят к системам дальнего действия, а с радиоканалом дальность действия составляет сотни и даже тысячи километров.

В цифровых телеизмерительных системах значение измеряемой величины передается по линиям связи кодовой комбинацией в виде комбинации импульсов. Наиболее часто применяется двоичный код, который на принимающей стороне преобразуется в единично-десятичный код, более удобный для цифрового воспроизведения измеряемой величины. Существенными достоинствами цифровых телеизмерительных систем являются высокие метрологические характеристики, возможность работы по различным каналам связи, высокая помехозащищенность и возможность вывода информации на ЭВМ. Недостаток таких систем в относительной сложности аппаратурного исполнения.

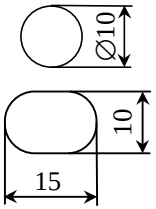
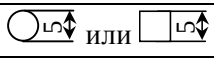
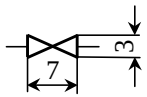
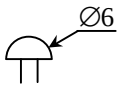
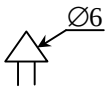
10.4 Принцип построения функциональных схем контроля и управления технологическим объектом

Проектирование любого объекта сопровождается разработкой функциональной схемы контроля и управления, которая является техническим документом, входящим в общую принципиальную схему управления. На функциональной схеме указываются места отбора сигналов (места установки чувствительных элементов), размещение измерительных (вторичных) приборов с указанием выполняемых ими функций, а также регуляторов, сигнализаторов и других средств управления объектом, включая средства телемеханики и вычислительной техники. Прилагаемая к функциональной схеме спецификация, содержащая в соответствии с указанными позициями на схеме развернутые характеристики используемых средств контроля и регулирования, служит основой для составления заявочных ведомостей на приборы.

На функциональной схеме упрощенно изображают технологический объект и располагают приборы и средства автоматизации в условных изображениях с указанием связей между ними.

Основные условные изображения приборов и средств автоматизации (ГОСТ 21.404–85) приведены в таблице 10.1.

Таблица 10.1 – Условные обозначения приборов и средств автоматизации

Наименование	Обозначение
Первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент), измерительный прибор, регулятор, устанавливаемый по месту: – базовое обозначение – допускаемое обозначение	
Прибор, устанавливаемый на щите	
Исполнительный механизм	
Регулирующий орган	
Лампа сигнальная	
Звонок электрический	
Гудок электрический	

Для обозначения измеряемых и регулируемых величин и функциональных признаков приборов приняты прописные буквы латинского алфавита (таблица 10.2)

Таблица 10.2 – Буквенные условные обозначения

Обозначение	Измеряемая величина		Функции, выполняемые прибором		
	Особое значение первой буквы	Дополнительное значение первой буквы	Отображение информации	Формирование выходного сигнала	Дополнительное значение
1	2	3	4	5	6
A	—	—	Сигнализация	—	—
B	Резервная буква	—	—	—	—
C	—	—	—	Регулирование	—
D	Плотность	Разность, перепад	—	—	—
E	Любая электрическая величина	—	—	—	Чувствительный элемент
F	Расход	Соотношение, доля, дробь	—	—	—
G	Размер, положение, перемещение	—	—	—	—
H	Ручное воздействие	—	—	—	Верхний предел величины
I	—	—	Показание	—	—

Продолжение таблицы 10.2

J	—	Автоматическое переключение	—	—	—
K	Время, временная программа	—	—	—	Станция управления
L	Уровень	—	—	—	—
M	Влажность	—	—	—	—
O, N	Резервные буквы	—	—	—	—
P	Давление, вакуум	—	—	—	—
Q	Качество, состав, концентрация	Интегрирование, суммирование	—	—	—
R	Радиоактивность	—	Регистрация	—	—
S	Скорость, частота	—	Сигнализация, включение, переключение	—	—
T	Температура	—	—	—	Дистанционная передача
U	Несколько разнородных величин	—	—	—	
V	Вязкость	—	—	—	
W	Масса	—	—	—	
Y	—	—	Преобразование	—	

Буквенные условные обозначения проставляются в верхней части окружности при следующем порядке расположения букв: первая буква – основная измеряемая величина, вторая буква – уточняющее (если необходимо) значение первой величины, третья и так далее (или вторая) – обозначение функционального признака прибора. Если в приборе несколько функциональных признаков, то они располагаются в следующей последовательности: IRCSA – показание, регистрация, регулирование, переключение, сигнализация. В ряде случаев для конкретизации измеряемой величины, например, концентрации вещества, около окружности (справа) указывается наименование или символ измеряемой величины: pH, O_2, CO и т.д.

Ниже приведены примеры построения условных обозначений для приборов измерения и регулирования следующих физических величин:

T – температура:

– первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент (термопара, термометр сопротивления и др.);

– прибор для измерения температуры, показывающий, установленный по месту (жидкостный термометр, манометрический термометр и др.);

– прибор для измерения температуры одноточечный, показывающий и регистрирующий, установленный на щите (потенциометр, мост, логометр и др.);

– прибор для измерения температуры, регистрирующий многоточечный;

– прибор для измерения температуры, регистрирующий с регулирующим устройством (потенциометр с двухпозиционным регулированием и др.);

– регулятор температуры;

– сигнализатор температуры;

– бесшкальный прибор с дистанционной передачей показаний.

P – давление, разрежение:

– электрический датчик давления (тензо– или пьезопреобразователь);

– дистанционная передача сигнала давления;

– прибор для измерения давления (разряжения), показывающий (показывающий манометр, тягомер, напоромер, вакуумметр);

– прибор для измерения перепада давления, показывающий (дифманометр);

– прибор для измерения давления, показывающий, регистрирующий;

– регулятор давления

F – расход:

– первичный измерительный преобразователь (чувствительный элемент) для измерения расхода (диафрагма. сопло, труба Вентури);

– регулятор расхода;

– прибор для измерения расхода, показывающий, регистрирующий;

– прибор для измерения расхода, показывающий, интегрирующий, с устройством для выдачи сигнала после прохождения заданного количества вещества;

– прибор для дистанционной передачи сигнала от датчика расхода

L – уровень:

– первичный измерительный преобразователь для измерения уровня.

– прибор для измерения уровня, показывающий с контактным устройством для выдачи сигнала по верхнему и нижнему значению уровня.

– регулятор уровня.

Q – качество:

– прибор для измерения качества продукта, показывающий (газоанализатор для контроля содержания кислорода).

– прибор для измерения качества продукта, регистрирующий, с регулирующим устройством (газоанализатор на CO с регулятором).

– обозначение других величин и операций:

– прибор для контроля погасания факела в печи, бесшкальный.

– прибор для измерения плотности раствора.

– прибор для измерения тока, напряжения, электрической мощности и других электрических величин, показывающий (амперметр, вольтметр и др.).

– прибор для измерения влажности среды, регистрирующий.

– указатель положения, установленный на щите, показывающий (например, положение регулирующего органа).

– аппаратура для ручного дистанционного управления, установленная на щите (кнопка, ключ управления).

– переключатель электрических цепей (управления), установленный на щите (задатчик, выбор вида управления и др.).

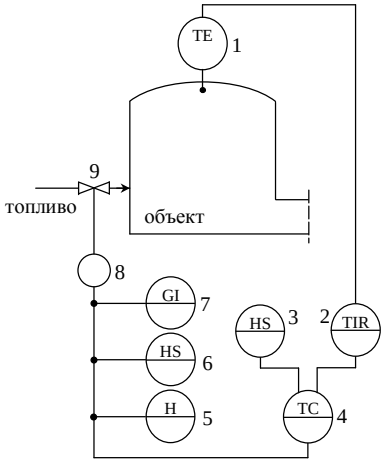
– вычислительное устройство, выполняющее функцию умножения на постоянный множитель, установленное на щите.

– преобразователь сигнала, установленный по месту (например, преобразователь давления в электрический сигнал).

– пусковая аппаратура (магнитный пускатель, контактор).

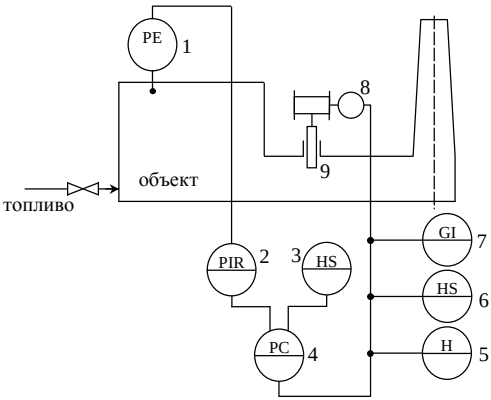
На рисунках 10.2, 10.3, 10.4 показаны простейшие функциональ-

ные схемы измерения и регулирования температуры, давления и расхода, выполненные в соответствии с ГОСТ 21.202 – 85.



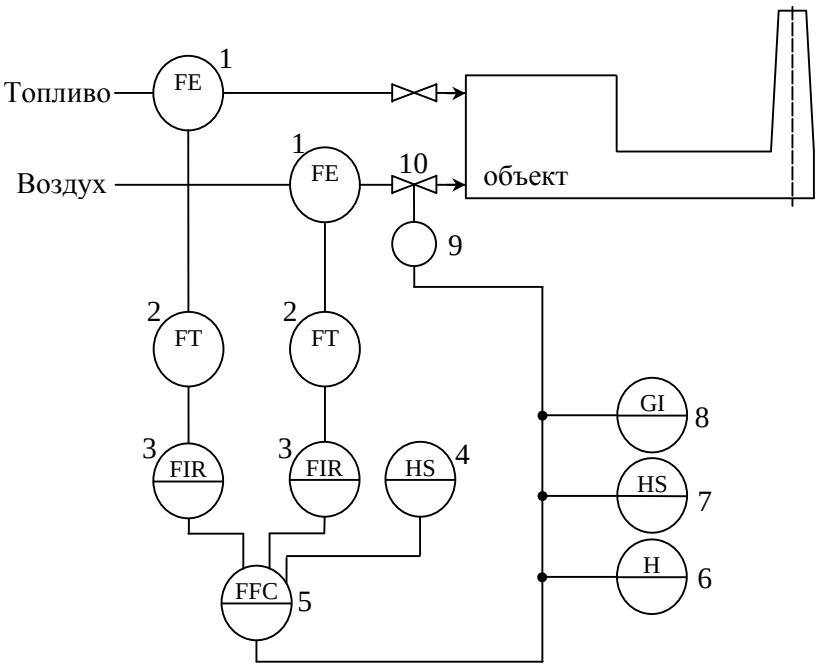
1 – датчик температуры; 2 – вторичный показывающий и регистрирующий прибор; 3 – ручной задатчик; 4 – регулятор; 5 – кнопки "больше–меньше"; 6 – переключатель управления "автоматическое–ручное"; 7 – указатель положения регулирующего органа; 8 – исполнительный механизм; 9 – регулирующий орган

Рисунок 10.2 – Схема измерения и регулирования температуры в печи



1 – датчик давления электрический; 2 – показывающий и регистрирующий прибор; 3 – задатчик; 4 – регулятор давления; 5 – кнопки управления "больше–меньше"; 6 – переключатель "автоматическое–ручное"; 7 – указатель положения регулирующего органа; 8 – исполнительный механизм; 9 – регулирующий орган

Рисунок 10.3 – Схема измерения и регулирования давления



1 – сужающие устройства; 2 – преобразователи перепада давления в электрические сигналы; 3 – показывающие и регистрирующие расходомеры; 4 – задатчик; 5 – регулятор расхода; 6 – кнопки управления "больше–меньше"; 7 – переключатель "автоматическое–ручное"; 8 – указатель положения регулирующего органа; 9 – исполнительный механизм; 10 – регулирующий орган.

Рисунок 10.4 – Схема измерения расхода и регулирования соотношения топливо/воздух

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Бурдун Г.Д., Марков Б.Н. Основы метрологии. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 256 с.
2. Тюрин Н.И. Введение в метрологию. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 304 с.
3. Широков К.П., Богуславский М.Г. Международная система единиц. – М.: Изд-во стандартов, 1984. – 157 с.
4. Шабалин С.А. Прикладная метрология. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 256 с.
5. Брянский Л.Н., Дойников А.С. Краткий справочник метролога. – М.: Изд-во стандартов, 1991. – 79 с.
6. Камке Д., Кремер К. Физические основы единиц измерения. – М.: Мир, 1980. – 203 с.
7. Основы метрологии и электрические измерения. / Б.Я. Авдеев, Е.М. Антонюк, Е.М. Душин и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. 480 с.
8. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.В. Качество измерений. – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
9. Основные термины в области метрологии. / М.Ф. Юдин, М.Н. Селиванов, О.Ф. Тищенко и др. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 113 с.
10. Качество и сертификация промышленной продукции. / А.Г. Гребенников, А.Г. Мялица, В.М. Рябченко и др. Учебное пособие – Харьков: Харьковский авиационный институт, 1998. – 395 с.
11. Иванова Г.М., Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 228 с.
12. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы. – М.: Энергия, 1978. – 703 с.
13. Котов К.И., Шершевер М.А. Средства измерения, контроля и автоматизации технологических процессов. Вычислительная и микропроцессорная техника. – М.: Металлургия, 1989. – 496 с.

14. Крамарухин Ю.Е. Приборы для измерения температуры. – М.: Машиностроение, 1990. – 208 с.
15. Кесова Л.А. Контроль и автоматическое управление пылеподачей на ТЭС. – К.: Вища школа, 1991. – 142 с.
16. Огнеупорные экранирующие насадки к отсасывающей термопаре. / Р.И. Сарбаш, А.И. Туяхов, А.Т. Яковенко // Бюллетень ЦИИН ЧМ – 1963 – № 13. – с. 49-50.
17. Поскачей А.А., Чарихов Л.А. Пирометрия объектов с изменяющейся излучательной способностью. – М.: Металлургия, 1978. – 200 с.
18. Бухонина Л.В., Гитлин Л.Д., Шершевер М.А. Измерение и контроль технологических параметров. – К.: Техніка, 1984. – 183 с.
19. Влияние запыленности печной атмосферы на тепловую работу факела. / А.И. Туяхов // Сб. Совершенствование производства черных металлов. – К.: Техніка. – 1975. – с. 63-66.
20. Кегельман Д.Н., Эскин Н.Б. Наладка котельных установок. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1989 – 320 с.
21. Разработка система автоматического управления тепловым режимом мартеновских печей / М.Н. Стрелец, Н.Г. Земляной, А.А. Тарасенко, А.И. Туяхов. // Материалы научн. техн. конф. – Донецк, 1970 – с. 14-15.
22. Вепшек Я. Измерение низких температур электрическими методами. – М.: Энергия, 1980. – 224 с.
23. Глинков Г.М., Косырев А.И., Шевцов Е.К. Контроль и автоматизация металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1989. – 352 с.
24. Кузнецов Н.Д., Чистяков В.С.. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 324 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Коэффициенты распределения Стьюдента

Таблица А.1 – Коэффициенты распределения Стьюдента

Доверительная вероятность, P	Число степеней свободы, f						
	3	4	5	6	8	10	12
0,90	2,35	2,13	2,01	1,94	1,86	1,81	1,78
0,95	3,18	2,78	2,57	2,45	2,31	2,23	2,18
0,99	5,84	4,60	4,03	3,71	3,36	3,17	3,06
Доверительная вероятность, P	Число степеней свободы, f						
	18	22	30	40	60	120	∞
0,90	1,73	1,72	1,70	1,68	1,67	1,66	1,64
0,95	2,10	2,07	2,04	2,02	2,00	1,98	1,96
0,99	2,88	2,82	2,75	2,70	2,66	2,62	2,58

Таблица А.2 – Значения $t_к$ для различных $P_к$ и n

$P_к$	n							
	2	3	4	5	6	7	8	9
0,05	15,56	4,97	3,56	3,04	2,78	2,62	2,51	2,43
0,02	38,97	8,04	5,08	4,10	3,64	3,36	3,18	3,05
0,01	77,96	11,46	6,53	5,04	4,36	3,39	3,71	3,54
0,005	77,97	36,5	14,46	9,43	7,41	6,37	5,73	5,31

$P_к$	n						
	10	12	14	16	18	20	∞
0,05	2,37	2,29	2,24	2,20	2,17	2,145	1,96
0,02	2,83	2,83	2,74	2,68	2,64	2,60	2,33
0,01	3,23	3,23	3,12	3,04	3,00	2,93	2,58
0,005	4,62	4,62	4,37	4,20	4,07	3,98	3,29

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Монохроматический коэффициент теплового излучения различных материалов при λ=0,65 мкм

Материал	Температура, °С	ε_λ	Материал	Температура, °С	ε_λ
Железо	1000	0,39	Платина жидкая	1800	0,38
Железо жидкое	1500	0,36	Чугун твердый	20	0,37
Магний	20	0,59	Чугун жидкий	1400	0,40
Марганец	20	0,59	Хромель	20	0,35
Медь твердая	20	0,11	Алюмель	20	0,37
Медь жидкая	1100	0,15	Алюминий оксид	20	0,22
Молибден твердый	1000	0,40	Алюминий оксид	1500	0,40
Молибден твердый	2000	0,36	Железа оксид	20	0,70
Молибден жидкий	2500	0,33	Меди оксид	20	0,70
Никель твердый	20	0,36	Никеля оксид	20	0,90
Никель жидкий	1500	0,37	Сталь хромоникелевая окисленная	20	0,85
Серебро твердое и жидкое	—	0,07	Сталь углеродистая окисленная	20	0,80
Уголь (графит)	1000	0,90			
Уголь (графит)	2000	0,85	Чугун окисленный	20	0,70
Уголь (графит)	3000	0,81	Алюмель окисленный	20	0,87
Хром твердый	20	0,34	Хромель окисленный	20	0,78
Хром жидкий	1900	0,39	Фарфор	—	0,25–0,50
Сталь углеродистая твердая	20	0,44	Шамот	—	0,70–0,80
Сталь углеродистая жидкая	1600	0,37	Шлак жидкий	1650	0,65
Платина твердая	1500	0,30			

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Коэффициент полного теплового излучения (интегральный коэффициент теплового излучения) различных материалов

Материал	t, °C	ε_T
Алюминий:		
полированный	200–600	0,04–0,06
сильноокисленный	100–600	0,20–0,33
Вольфрам	230–2230	0,54–0,31
нить	2800	0,39
Железо:		
полированное	425–1020	0,144–0,377
покрытое–толстым слоем ржавчины	40	0,85
литое необработанное	925–1125	0,87–0,95
Сталь:		
листовая шлифованная	930	0,55
прокатанная окисленная	40	0,66
листовая шероховатая	4&	0,80 ,
расплавленная	1600–1800	0,28
Чурун:		
полированный	200	0,21
покрытый пленкой окисленный	40	0,70–0,80
шероховатый	40–250	0,95
расплавленный	1300–1400	0,29
Золото чистое полированное	90–600	0,02–0,035
Латунь:		
полированная	275	0,03
прокатанная	20	0,06
тусклая пластина	40–260	0,22
окисленная при нагреве до 600 °С	200–600	0,61-0,59
Медь:		
полированная	90	0,02
полированная, слегка окисленная	40	0,05
окисленная при нагреве до 600 °С	200–600	0,57–0,55
черная окисленная	40	0,76
расплавленная	1075–1275	0,16–0,13

Продолжение приложения В

Материал	t, °C	ε_T
Никель:		
полированный	40–260	0,05–0,07
окисленный	40–260	0,35–0,49
проволока	260–1100	0,10–0,19
Платина:		
электролитическая	260–500	0,06–0,10
лента	540–1100	0,12–0,14
проволока	200–1375	0,07–0,18
Серебро:		
полированное	40–540	0,01–0,03
окисленное	40–540	0,02–0,04
Асбест картон	40	0,96
Огнеупоры:		
слабо излучающие	1000	0,75
сильно излучающие	1000	0,85–0,90
Кирпич:		
динас	1000	0,85
шамот	1000	0,59
магнезит	1000	0,38
Фарфор глазурованный	40	0,93
Глина огнеупорная	90	0,91
Кварц	40–540	0,89–0,58
Слюда	40	0,75
Стекло пирекс	260–540	0,94–0,75
Вода, слой 0,1 мм и более	40	0,96
Уголь:		
нить	1050–1450	0,53
сажа	40	0,95
Обмазка из жидкого стекла с сажей	100–225	0,96–0,95

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Градуировочная характеристика хромель–копелевой (ХК) термопары в диапазоне температур –50…+800°С

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
–50	–3,110									
–40	–2,500	–2,561	–2,622	–2,683	–2,744	–2,805	–2,866	–2,927	–2,988	–3,049
–30	–1,890	–1,951	–2,012	–2,073	–2,134	–2,195	–2,256	–2,317	–2,378	–2,439
–20	–1,270	–1,336	–1,394	–1,456	–1,518	–1,580	–1,642	–1,704	–1,766	–1,828
–10	–0,640	–0,703	–0,766	–0,829	–0,892	–0,955	–1,018	–1,081	–1,144	–1,207
–0	–0,000	–0,064	–6,128	–0,192	–0,256	–0,320	–0,384	–0,448	–0,512	–0,576
+0	0,000	0,064	0,128	0,192	0,256	0,321	0,386	0,451	0,516	0,581
10	0,646	0,711	0,776	0,841	0,907	0,973	1,039	1,105	1,171	1,237
20	1,303	1,370	1,437	1,504	1,571	1,638	1,705	1,772	1,840	1,908
30	1,976	2,044	2,112	2,180	2,248	2,316	2,384	2,452	2,520	2,589
40	2,658	2,727	2,796	2,865	2,934	3,003	3,072	3,141	3,210	3,280
50	3,350	3,420	3,490	3,560	3,630	3,700	3,770	3,840	3,910	3,980
60	4,050	4,121	4,192	4,263	4,334	4,405	4,476	4,547	4,618	4,689
70	4,760	4,831	4,902	4,973	5,044	5,115	5,186	5,257	5,327	5,398
80	5,469	5,540	5,611	5,682	5,753	5,824	5,895	5,966	6,037	6,108
90	6,179	6,250	6,322	6,394	6,466	6,538	6,610	6,682	6,754	6,826
100	6,898	6,970	7,043	7,116	7,189	7,262	7,335	7,408	7,481	7,554
110	7,627	7,700	7,774	7,848	7,922	7,996	8,070	8,144	8,218	8,292
120	8,366	8,440	8,515	8,590	8,665	8,740	8,815	8,890	8,965	9,040
130	9,115	9,190	9,265	9,340	9,415	9,490	9,565	9,640	9,715	9,790
140	9,865	9,940	10,016	10,092	10,168	10,244	10,320	10,396	10,472	t0,548
150	10,624	10,700	10,777	10,854	10,931	11,008	11,085	11,162	11,239	11,316
160	11,393	11,470	11,548	11,626	11,704	11,782	11,860	11,938	12,016	12,094
170	12,172	12,250	12,329	12,408	12,487	12,566	12,645	12,724	12,803	12,882
180	12,961	13,040	13,120	13,200	13,280	13,360	13,440	13,520	13,600	13,680
190	13,760	13,841	13,922	14,003	14,084	14,165	14,246	14,327	14,408	14,489
200	14,570	14,651	14,732	14,813	14,894	14,975	15,056	15,137	15,218	15,299
210	15,380	15,462	15,544	15,626	15,708	15,790	15,872	15,954	16,036	16,118

Продолжение приложения Г

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
220	16,200	16,283	16,366	16,449	16,532	16,615	16,698	16,781	16,864	16,947
230	17,030	17,113	17,196	17,279	17,362	17,445	17,528	17,611	17,694	17,777
240	17,860	17,943	18,026	18,109	18,192	18,275	18,358	18,441	18,524	18,607
250	17,690	18,773	18,856	18,939	19,022	19,105	19,188	19,271	19,354	19,437
260	19,520	19,604	19,688	19,772	19,856	19,940	20,024	20,108	20,192	20,276
270	20,360	20,444	20,528	20,612	20,696	20,780	20,864	20,948	21,032	21,116
280	21,200	21,284	21,368	£1,452	21,536	21,620	21,764	24,788	21,872	21,956
290	22,040	22,124	22,208	22,292	22,376	22,460	22,544	22,628	22,712	22,796
300	22,880	22,964	23,048	23,132	23,216	23,300	23,384	23,468	23,552	23,636
310	23,720	23,804	23,888	23,972	24,056	24,140	24,224	24,308	24,392	24,476
320	24,560	24,645	24,730	24,815	24,900	24,985	25,070	25,155	25,240	25,325
330	25,410	25,496	25,582	25,668	25,754	25,840	25,926	26,012	26,098	26,184
340	26,270	26,356	26,442	26,528	26,614	26,700	26,786	26,872	26,958	27,044
350	27,130	27,217	27,304	27,391	27,478	27,565	27,652	27,739	27,826	27,913
360	28,000	28,087	28,174	28,261	28,348	28,435	28,522	28,609	28,696	28,783
370	28,870	28,957	29,044	29,131	29,218	29,305	29,392	29,479	29,566	29,656
380	29,740	29,827	29,914	30,001	30,088	30,175	30,262	30,349	30,436	30,523
390	30,610	30,697	30,784	30,871	30,958	31,045	31,132	31,219	31,306	31,393
400	31,480	31,567	31,654	31,741	31,828	31,915	31,002	32,089	32,176	32,263
410	32,350	32,438	32,526	32,614	32,702	32,790	32,878	32,966	33,054	33,142
420	33,230	33,318	33,406	33,494	33,582	33,670	33,758	33,846	33,934	34,022
430	34,110	34,198	34,286	34,374	34,462	34,550	34,638	34,726	34,814	34,902
440	34,990	35,078	35,116	35,254	35,342	35,430	35,518	35,606	35,694	35,782
450	35,870	35,958	36,046	36,134	36,222	36,310	36,398	36,486	36,574	36,662
460	36,750	36,838	36,926	37,014	37,102	37,190	37,278	37,366	37,454	37,542
470	37,630	37,718	37,806	37,894	37,982	38,070	38,158	38,246	38,334	38,432
480	38,510	38,598	38,686	38,774	38,862	38,950	39,038	39,126	39,214	39,302
490	39,390	39,478	39,566	39,654	39,742	39,830	39,918	40,006	40,094	40,128
500	40,270	40,358	40,446	40,534	40,622	40,710	40,798	40,886	40,974	41,062
510	41,150	41,238	41,326	41,414	41,502	41,590	41,678	41,766	41,854	41,942
520	42,030	42,118	42,206	42,294	42,382	42,470	42,558	42,646	42,734	42,822

Продолжение приложения Г

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
530	42,910	42,998	43,08?	43,174	43,262	43,350	43,438	43,526	43,614	43,702
540	43,790	43,878	43,966	44,054	44,142	44,230	44,318	44,406	44,494	44,582
550	44,670	44,758	44,846	44,934	45,022	45,110	45,198	45,286	45,374	45,462
560	45,550	45,639	45,728	45,817	45,906	45,995	46,084	46,178	46,262	46,351
570	46,440	46,529	46,618	46,707	46,796	46,885	46,974	47,063	47,152	47,241
580	47,330	47,418	47,506	47,594	47,682	47,770	47,858	47,946	48,034	48,122
590	48,210	48,298	48,386	48,474	48,562	48,650	48,738	48,826	48,914	49,002
600	49,090	49,178	49,266	49,354	49,442	49,530	49,618	49,706	49,794	49,882
610	49,970	50,058	50,146	50,234	50,322	50,410	50,498	50,586	50,674	50,762
620	50,850	50,938	51,026	51,114	51,202	51,290	51,378	51,466	51,554	51,642
630	51,730	51,818	51,906	51,994	52,082	52,170	52,258	52,346	52,434	52,522
640	52,610	52,697	52,784	52,871	52,958	53,045	53,132	53,219	53,306	53,393
650	53,480	53,567	53,654	53,741	53,828	53,915	54,002	54,089	54,176	54,263
660	54,350	54,437	54,524	54,611	54,698	54,785	54,872	54,959	55,046	55,133
670	55,220	55,307	55,394	55,481	55,598	55,655	55,742	55,829	55,916	56,003
680	56,090	56,177	56,264	56,351	56,438	56,525	56,612	56,699	56,786	56,873
690	56,960	57,046	57,132	57,218	57,304	57,390	57,476	57,562	57,648	57,734
700	57,820	57,906	57,992	58,078	58,164	58,250	58,336	58,422	58,508	58,594
710	58,680	58,766	58,852	58,938	59,024	59,110	59,196	59,282	59,368	59,454
720	59,540	59,626	59,712	59,798	59,884	59,970	60,056	60,142	60,228	60,314
730	60,400	60,486	60,572	60,658	60,744	60,830	60,916	61,002	61,088	61,174
740	61,260	61,346	61,432	61,518	61,604	61,690	61,776	61,862	61,948	62,034
750	62,120	62,206	62,292	62,378	62,464	62,550	62,636	62,722	62,808	62,894
760	62,980	63,066	63,152	63,238	63,324	63,410	63,496	63,582	63,668	63,754
770	63,840	63,926	64,012	64,098	64,184	64,270	64,356	64,442	64,528	64,614
780	64,700	64,786	64,872	64,958	65,044	65,130	65,216	65,302	65,388	65,474
790	65,560	65,646	65,732	65,818	65,904	65,990	66,076	66,162	66,248	66,334
800	66,420									

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Градуировочная характеристика хромель–алюмелевой термопары в диапазоне температур –200…+1300°С

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
–200	–5,892									
–190	–5,730	–5,747	–5,764	–5,781	–5,797	–5,813	–5,829	–5,845	–5,861	–5,877
–180	–5,550	–5,568	–5,587	–5,605	–5,624	–5,642	–5,660	–5,677	–5,695	–5,712
–170	–5,354	–5,374	–5,394	–5,414	–5,434	–5,454	–5,474	–5,493	–5,512	–5,531
–160	–5,141	–5,163	–5,185	–5,207	–5,228	–5,249	–5,270	–5,291	–5,312	–5,333
–150	–4,913	–4,936	–4,959	–4,983	–5,006	–5,029	–5,051	–5,074	–5,096	–5,119
–140	–4,669	–4,694	–4,718	–4,743	–4,767	–4,792	–4,816	–4,840	–4,865	–4,889
–130	–4,410	–4,436	–4,462	–4,489	–4,515	–4,541	–4,567	–4,592	–4,618	–4,643
–120	–4,138	–4,166	–4,193	–4,221	–4,248	–4,276	–4,303	–4,330	–4,356	–4,383
–110	–3,852	–3,881	–3,910	–3,939	–3,968	–3,997	–4,025	–4,053	–4,082	–4,110
–100	–3,553	–3,583	–3,613	–3,644	–3,674	–3,704	–3,734	–3,763	–3,793	–3,822
–90	–3,242	–3,273	–3,305	–3,336	–3,368	–3,399	–3,430	–3,461	–3,491	–3,522
–80	–2,920	–2,952	–2,985	–3,017	–3,050	–3,082	–3,114	–3,146	–3,178	–3,210
–70	–2,586	–2,620	–2,653	–2,687	–2,720	–2,754	–2,787	–2,820	–2,854	–2,887
–60	–2,243	–2,278	–2,312	–2,347	–2,381	–2,416	–2,450	–2,484	–2,518	–2,552
–50	–1,889	–1,925	–1,960	–1,996	–2,031	–2,067	–2,102	–2,137	–2,173	–2,208
–40	–1,527	–1,563	–1,600	–1,636	–1,673	–1,709	–1,745	–1,781	–1,817	–1,853
–30	–1,156	–1,193	–1,231	–1,268	–1,305	–1,342	–1,379	–1,416	–1,453	–1,490
–20	–0,777	–0,815	–0,853	–0,891	–0,929	–0,967	–1,005	–1,043	–1,081	–1,118
–10	–0,392	–0,431	–0,469	–0,508	–0,547	–0,585	–0,624	–0,662	–0,701	–0,739
–0	0,000	–0,039	–0,079	–0,118	–0,157	–0,197	–0,236	–0,275	–0,314	–0,353
0	0,000	0,039	0,079	0,119	0,158	0,198	0,238	0,277	0,317	0,357
10	0,397	0,437	0,477	0,517	0,557	0,597	0,637	0,677	0,718	0,758
20	0,798	0,838	0,879	0,919	0,960	1,000	1,041	1,081	1,122	1,162
30	1,203	1,244	1,285	1,325	1,366	1,407	1,448	1,489	1,529	1,570
40	1,611	1,652	1,693	1,734	1,776	1,817	1,858	1,899	1,940	1,981
50	2,022	2,064	2,105	2,146	2,188	2,229	2,270	2,312	2,353	2,394
60	2,436	2,477	2,519	2,560	2,601	2,643	2,684	2,736	2,767	2,809
70	2,850	2,892	2,933	2,975	3,016	3,058	3,100	3,141	3,183	3,224

Продолжение приложения Д

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
80	3,266	3,307	3,349	3,390	3,432	3,473	3,515	3,556	3,598	3,639
90	3,681	3,722	3,764	3,805	3,847	3,888	3,930	3,971	4,012	4,054
100	4,095	4,137	4,178	4,219	4,261	4,302	4,343	4,384	4,426	4,467
110	4,508	4,549	4,590	4,632,	4,673	4,714	4,755	4,796	4,837	4,878
120	4,919	4,960	5,001	5,042	5,083	5,124	5,164	5,205	5,246	5,287
130	5,327	5,368	5,409	5,450	5,490	5,531	5,571	5,612	5,652	5,693
140	5,733	5,774	5,814	5,855	5,895	5,936	5,976	6,016	6,057	6,097
150	6,137	6,177	6,218	6,258	6,298	6,338	6,378	6,419	6,459	6,499
160	6,539	6,579	6,619	6,659	6,699	6,739	6,779	6,819	6,859	6,899
170	6,939	6,979	7,019	7,059	7,099	7,139	7,179	7,219	7,259	7,299
180	7,338	7,378	7,418	7,458	7,498	7,538	7,578	7,618	7,658	7,697
190	7,737	7,777	7,817	7,857	7,897	7,937	7,977	8,017	8,057	8,097
200	8,137	8,177	8,217	8,257	8,297	8,337	8,377	8,417	8,457	8,497
210	8,537	8,577	8,617	8,657	8,697	8,737	8,777	8,817	8,857	8,898
220	8,938	8,978	9,018	9,058	9,099	9,139	9,179	9,220	9,260	9,300
230	9,341	9,381	9,421	9,462	9,502	9,543	9,583	9,624	9,664	9,705
240	9,745	9,786	9,826	9,867	9,907	9,948	9,989	10,029	10,070	10,111
250	10,151	10,192	10,233	10,274	10,315	10,355	10,396	10,437	10,478	10,519
260	10,560	10,600	10,641	10,682	10,723	10,764	10,805	10,846	10,887	10,928
270	10,969	11,010	11,051	11,093	11,134	11,175	11,216	11,257	11,298	11,339
280	11,381	11,422	11,463	11,504	11,546	11,587	11,628	11,669	11,71	11,752
290	11,793	11,835	11,876	11,918	11,959	12,000	12,042	12,083	12,125	12,166
300	12,207	12,249	12,290	12,332	12,373	12,415	12,456	12,498	12,539	12,581
310	12,623	12,664	12,706	12,747	12,789	12,831	12,872	12,914	12,955	12,997
320	13,039	13,080	13,122	13,164	13,205	13,247	13,289	13,331	13,372	13,414
330	13,456	13,497	13,539	13,581	13,623	13,665	13,706	13,748	13,790	13,832
340	13,874	13,915	13,957	13,999	14,041	14,083	14,125	14,167	14,208	14,250
350	14,292	14,334	14,376	14,418	14,460	14,502	14,544	14,586	14,628	14,670
360	14,712	14,754	14,796	14,838	14,880	14,922	14,964	15,006	15,048	15,090
370	15,132	15,174	15,216	15,258	15,300	15,342	15,384	15,426	15,468	15,510
380	15,552	15,594	15,636	15,679	15,721	15,763	15,805	15,847	15,889	15,931
390	15,974	16,016	16,058	16,100	16,142	16,184	16,227	16,269	16,311	16,353
400	16,395	16,438	16,480	16,522	16,564	16,607	16,649	16,691	16,733	16,776
410	16,818	16,860	16,902	16,945	16,987	17,029	17,072	17,114	17,156	17,199

Продолжение приложения Д

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
420	17,241	17,283	17,826	17,368	17,410	17,453	17,495	17,537	17,580	17,622
430	17,664	17,707	17,749	17,792	17,834	17,876	17,919	17,961	18,004	18,046
440	18,088	18,131	18,173	18,216	18,258	18,301	18,343	18,385	18,428	18,470
450	18,513	18,555	18,598	18,640	18,683	18,725	18,768	18,810	18,853	18,895
460	18,938	18,980	19,023	19,065	19,108	19,150	19,193	19,235	19,278	19,320
470	19,363	19,405	19,448	19,490	19,533	19,576	19,618	19,661	19,703	19,746
480	19,788	19,831	19,873	19,916	19,959	20,001	20,004	20,086	20,129	20,172
490	20,214	20,257	20,299	20,342	20,385	20,427	20,470	20,512	20,555	20,598
500	20,640	20,683	20,725	20,768	20,811	20,853	20,896	20,938	20,981	21,024
510	21,066	21,109	21,152	21,194	21,237	21,280	21,322	21,365	21,407	21,450
520	21,493	21,535	21,578	21,621	21,663	21,706	21,749	21,791	21,834	21,876
530	21,919	21,962	22,004	22,047	22,090	22,132	22,175	22,218	22,260	22,303
540	22,346	22,388	22,431	22,473	22,516	22,559	22,601	22,644	22,687	22,729
550	22,772	22,815	22,857	22,900	22,942	22,985	23,028	23,070	23,113	23,156
560	23,198	23,241	23,284	23,326	23,369	23,411	23,454	23,497	23,539	23,582
570	23,624	23,667	23,710	23,754	23,795	23,837	23,880	23,923	23,965	24,008
580	24,050	24,093	24,136	24,178	24,221	24,263	24,306	24,348	24,391	24,434
590	24,476	24,519	24,561	24,604	24,646	24,689	24,731	24,774	24,817	24,859
600	24,902	24,944	24,987	25,029	25,072	25,114	25,157	25,199	25,242	25,284
610	25,327	25,369	25,412	25,454	25,497	25,539	25,582	25,624	25,666	25,709
620	25,751	25,794	25,836	25,879	25,921	25,964	26,006	26,048	26,091	26,133
630	26,176	26,218	26,260	26,303	26,345	26,387	26,430	26,472	26,515	26,557
640	26,599	26,642	26,684	26,726	26,769	26,811	26,853	26,896	26,938	26,980
650	27,022	27,065	27,107	27,149	27,192	27,234	27,276	27,318	27,361	27,403
660	27,445	27,487	27,529	27,572	27,614	27,656	27,698	27,740	27,783	27,825
670	27,867	27,909	27,951	27,993	28,035	28,078	28,120	28,162	28,204	28,246
680	28,288	28,330	28,372	28,414	28,456	28,498	28,540	28,583	28,625	28,667
690	28,709	28,751	28,793	28,835	28,877	28,919	28,961	29,002	29,044	29,086
700	29,128	29,170	29,212	29,254	29,296	29,338	29,380	29,422	29,464	29,505
710	29,547	29,589	29,631	29,673	29,715	29,756	29,798	29,840	29,882	29,924
720	29,965	30,007	30,049	30,091	30,132	30,174	30,216	30,257	30,299	30,341
730	30,383	30,424	30,466	30,508	30,549	30,591	30,632	30,674	30,716	30,757
740	30,799	30,840	30,882	30,924	30,965	31,007	31,048	31,090	31,131	31,173
750	31,214	31,256	31,297	31,339	31,380	31,422	31,463	31,504	31,546	31,587

Продолжение приложения Д

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
760	31,629	31,670	31,712	31,753	31,794	31,836	31,877	31,918	31,960	32,001
770	32,042	32,084	32,125	32,166	32,207	32,249	32,290	32,331	32,372	32,414
780	32,455	32,496	32,537	32,578	32,619	32,661	32,702	32,743	32,784	32,825
790	32,866	32,907	32,948	3?,990	33,031	33,072	33,113	33,154	33,195	33,236
800	33,277	33,318	33,359	33,400	33,441	33,482	33,523	33,564	33,604	33,645
810	33,686	33,727	33,768	33,809	33,850	33,891	33,931	33,972	34,013	34,054
820	34,095	34,136	34,176	34,217	34,258	34,299	34,339	34,380	34,421	34,461
830	34,502	34,543	34,583	34,624	34,665	34,705	34,746	34,787	34,827	34,868
840	34,909	34,949	34,990	35,030	35,071	35,111	35,152	35,192	35,233	35,273
850	35,314	35,354	35,395	35,435	35,476	35,516	35,557	35,597	35,637	35,678
860	35,718	35,758	35,799	35,839	35,880	35,920	35,960	36,000	36,041	36,081
870	36,121	36,162	36,202	36,242	36,282	36,323	36,363	36,403	36,443	36,483
880	36,524	36,564	36,604	36,644	36,684	36,724	36,764	36,804	36,844	36,885
890	36,925	36,965	37,005	37,045	37,085	37,125	37,165	37,205	37,245	37,285
900	37,325	37,365	37,405	37,445	37,484	37,524	37,564	37,604	37,644	37,684
910	37,724	37,764	37,803	37,843	37,893	37,923	37,963	38,002	38,042	38,082
920	38,122	38,162	38,201	38,241	38,281	38,320	38,360	38,400	38,439	38,479
930	38,519	38,558	38,598	38,638	38,677	38,717	38,756	38,796	38,836	38,875
940	38,915	38,954	38,994	39,033	39,073	39,112	39,152	39,191	39,231	39,270
950	39,310	39,349	39,388	39,428	39,467	39,507	39,546	39,585	39,625	39,664
960	39,703	39,743	39,782	39,821	39,861	39,900	39,939	39,979	40,018	40,057
970	40,096	40,136	40,175	40,214	40,253	40,292	40,332	40,371	40,410	40,449
980	40,488	40,527	40,566	40,605	40,645	40,684	40,723	40,762	40,810	40,840
990	40,879	40,918	40,957	40,996	41,035	41,074	41,113	41,152	41,191	41,23b
1000	41,26	41,308	41,347	41,385	41,424	41,463	41,502	41,541	41,580	41,619
1010	41,657	41,696	41,735	41,774	41,813	41,851	41,890	41,929	41,968	42,006
1020	42,045	42,084	42,123	42,161	42,200	42,239	42,277	42,316	42,355	42,393
1030	42,432	42,470	42,509	42,548	42,586	42,625	42,663	42,702	42,740	42,779
1040	42,817	42,856	42,894	42,933	42,971	43,010	43,048	43,087	43,125	43,164
1050	43,202	43,240	43,279	43,317	43,356	43,394	43,432	43,471	43,509	43,547
1060	43,585	43,624	43,662	43,700	43,739	43,777	43,815	43,853	43,891	43,930
1070	43,968	44,006	44,044	44,082	44,121	44,159	44,197	44,235	44,273	44,311
1080	44,349	44,387	44,425	44,463	44,501	44,539	44,577	44,615	44,653	44,691
1090	44,729	44,767	44,805	44,843	44,881	44,919	44,957	44,995	45,033	45,070

Продолжение приложения Д

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1100	45,108	45,146	45,184	45,222	45,260	45,297	45,335	45,373	45,411	45,448
1110	45,486	45,524	45,561	45,599	45,637	45,675	45,712	45,750	45,787	45,825
1120	45,863	45,900	45,938	45,975	46,013	46,051	46,088	46,126	46,163	46,201
1130	46,238	46,275	46,313	46,350	46,388	46,425	46,463	46,500	46,537	46,575
1140	46,612	46,649	46,687	46,724	46,761	46,799	46,836	46,873	46,910	46,948
1150	46,985	47,022	47,059	47,096	47,134	47,171	47,208	47,245	47,282	47,319
1100	47,356	47,393	47,430	47,467	47,504	47,541	47,578	47,615	47,652	47,689
1170	47,726	47,763	47,800	47,837	47,874	47,911	47,948	47,985	48,021	48,058
1180	48,095	48,132	48,169	48,205	48,242	48,279	48,316	48,352	48,389	48,426
1190	48,462	48,499	48,536	48,572	48,609	48,645	48,682	48,718	48,755	48,792
1200	48,828	48,865	48,901	48,937	48,974	49,010	49,047	49,083	49,120	49,156
1210	49,192	49,229	49,265	49,301	49,338	49,374	49,410	49,446	49,483	49,519
1220	49,555	49,591	49,627	49,663	49,700	49,736	49,772	49,808	49,844	49,880
1230	49,916	49,952	49,988	50,024	50,060	50,096	50,132	50,168	50,204	50,240
1240	50,276	50,311	50,347	50,383	50,419	50,455	50,491	50,526	50,562	50,598
1250	50,633	50,669	50,705	50,741	50,776	50,812	50,847	50,883	50,919	50,954
1260	50,990	51,025	51,061	51,096	51,132	51,167	51,203	51,238	51,274	51,309
1270	51,344	51,380	51,415	51,450	51,486	51,521	51,556	51,592	51,627	51,662
1280	51,697	51,733	51,768	51,803	51,838	51,873	51,908	51,943	51,979	52,014
1290	52,049	52,084	52,119	52,154	52,189	52,224	52,259	52,294	52,329	52,364
1300	52,398									

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Градуировочная характеристика платинородий (10 %)–платиновой термопары (ПП) в диапазоне температур 0–1600 °С

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,005	0,011	0,016	0,022	0,027	0,033	0,,038	0,044	0,049
10	0,055	0,061	0,067	0,072	0,078	0,084	0,090	0,096	0,101	0,107
20	0,113	0,119	0,125	0,130	0,136	0,142	0,148	0,154	0,161	0,167
30	0,173	0,179	0,185	0,191	0,197	0,203	0,209	0,216	0,222	0,229
40	0,235	0,241	0,247	0,254	0,260	0,266	0,273	0,279	0,286	0,292
50	0,299	0,305	0,312	0,318	0,325	0,331	0,338	0,344	0,351	0,358
60	0,364	0,371	0,378	0,384	0,391	0,398	0,405	0,412	0,418	0,425
70	0,432	0,439	0,446	0,453	0,460	0,467	0,474	0,481	0,488	0,495
80	0,502	0,509	0,516	0,523	0,530	0,537	0,544	0,551	0,559	0,566
90	0,573	0,580	0,587	0,595	0,602	0,609	0,616	0,623	0,631	0,638
100	0,645	0,652	0,660	0,667	0,675	0,682	0,689	0,697	0,704	0,712
110	0,719	0,727	0,734	0,742	0,749	0,757	0,765	0,772	0,780	0,787
120	0,795	0,803	0,810	0,818	0,825	0,833	0,841	0,849	0,856	0,864
130	0,872	0,880	0,887	0,895	0,902	0,910	0,918	0,926	0,934	0,942
140	0,950	0,958	0,966	0,973	0,981	0,989	0,997	1,005	1,013	0,021
150	1,029	1,037	1,045	1,053	1,061	1,069	1,077	1,085	1,093	1,101
160	1,109	1,117	1,125	1,133	1,141	1,149	1,157	1,165	1,174	1,182
170	1,190	1,198	1,206	1,215	1,223	1,231	1,239	1,248	1,256	1,265
180	1,273	1,281	1,289	1,298	1,306	1,314	1,322	1,331	1,339	1,348
190	1,356	1,364	1,373	1,381	1,390	1,398	1,406	1,415	1,423	1,432
200	1,440	1,448	1,457	1,465	1,474	1,482	1,491	1,499	1,508	1,516
210	1,525	1,534	1,542	1,551	1,559	1,568	1,577	1,585	1,594	1,602
220	1,611	1,620	1,628	1,637	1,645	1,654	1,663	1,672	1,680	1,689
230	1,698	1,707	1,715	1,724	1,732	1,741	1,750	1,759	1,767	1,776
240	1,785	1,794	1,803	1,811	1,820	1,829	1,838	1,847	1,855	1,864
250	1,873	1,882	1,891	1,899	1,908	1,917	1,926	1,935	1,944	1,953
260	1,962	1,971	1,980	1,988	1,997	2,006	2,015	2,024	2,033	2,042
270	2,051	2,060	2,069	2,078	2,087	2,096	2,105	2,114	2,123	2,132
280	2,141	2,150	2,159	2,168	2,177	2,186	2,195	2,204	2,214	2,223

Продолжение приложения Е

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
290	2,232	2,241	2,250	2,259	2,268	2,277	2,286	2,295	2,305	2,314
300	2,323	2,332	2,341	2,350	2,359	2,368	2,377	2,386	2,396	2,405
310	2,414	2,423	2,432	2,442	2,451	2,460	2,469	2,478	2,488	2,497
320	2,506	'2,515	2,525	2,534	2,544	2,553	2,562	2,571	2,581	2,590
330	2,599	2,608	2,618	2,627	2,637	2,646	2,655	2,664	2,674	2,683
340	2,692	2,701	2,711	2,720	2,730	2,739	2,748	2,758	2,767	2,777
350	2,786	2,795	2,805	2,814	2,824	2,833	2,842	2,852	2,861	2,871
360	2,880	2,889	2,899	2,908	2,918	2,927	2,936	2,946	2,955	2,965
370	2,974	2,984	2,993	3,003	3,012	3,022	3,031	3,041	3,050	3,060
380	3,069	3,079	3,088	3,098	3,107	3,117	3,126	3,136	3,145	3,155
390	3,164	3,174	3,183	3,193	3,202	3,212	3,222	3,231	3,241	3,250
400	3,260	3,270	3,279	3,289	3,298	3,308	3,318	3,327	3,337	3,346
410	3,356	3,366	3,375	3,385	3,394	3,404	3,414	3,423	3,433	3,442
420	3,452	3,462	3,471	3,481	3,490	3,500	3,510	3,520	3,529	3,539
430	3,549	3,559	3,568	3,578	3,587	3,597	3,607	3,616	3,626	3,635
440	3,645	3,655	3,665	3,674	3,684	3,694	3,704	3,714	3,723	3,733
450	3,743	3,753	3,762	3,772	3,781	3,791	3,801	3,811	3,820	3,83,0
460	3,840	3,850	3,860	3,869	3,879	3,889	3,899	3,909	3,918	3,928
470	3,938	3,948	3,958	3,967	3,977	3,987	3,997	4,007	4,016	4,026
480	4,036	4,046	4,056	4,066	4,076	4,086	4,096	4,106	4,115	4,125
490	4,135	4,145	4,155	4,164	4,174	4,184	4,194	4,204	4,214	4,224
500	4,234	4,244	4,254	4,263	4,273	4,283	4,293	4,303	4,313	4,323
510	4,333	4,343	4,353	4,362	4,372	4,382	4,392	4,402	4,412	4,422
520	4,432	4,442	4,452	4,462	4,472	4,482	4,492	4,502	4,512	4,522
530	4,532	4,542	4,552	4,562	4,572	4,582	4,592	4,602	4,612	4,622
540	4,632	4,642	4,652	4,662	4,672	4,682	4,692	4,702	4,712	4,722
550	4,732	4,742	4,752	4,762	4,772	4,782	4,792	4,802	4,812	4,822
560	4,832	4,842	4,852	4,86S	4,873	4,883	4,893	4,903	4,913	4,923
570	4,933	4,943	4,953	4,96?	4,974	4,984	4,994	5,004	5,014	5,024
580	5,034	5,044	5,054	5,065	5,075,	5,085	5,095	5,105	5,116	5,126
590	5,136	5,146	5,156	5,166	5,176	5,186	5,196	5,206	5,217	5,227
600	5,237	5,247	5,257	5,268	5,278	5,288	5,298	5,308	5,319	5,329
610	5,339	5,349	5,360	5,370	5,381	5,391	5,401	5,411	5,422	5,432 '

Продолжение приложения Е

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
620	5,442	5,452	5,462	5,473	5,483	5,493	5,503	5,513	5,524	5,534
630	5,544	5,554	5,565	5,575	5,586	5,596	5,606	5,617	5,627	5,638
640	5,648	5,658	5,669	5,679	5,690	5,700	5,710	5,720	5,731	5,741
650	5,751	5,761	5,772	5,782	5,793	5,803	5,813	5,824	5,834	5,845
660	5,855	5,865	5,876	5,886	5,897	5,907	5,918	5,928	5,939	5,949
670	5,960	5,970	5,981	5,991	6,002	6,012	6,022	6,033	6,043	6,054
680	6,064	6,075	6,085	6,096	6,106	6,117	6,127	6,138	6,148	6,159
690	6,169	6,180	6,190	6,201	6,211	6,222	6,232	6,243	6,253	6,264
700	6,274	6,285	6,295	6,306	6,316	6,327	6,338	6,348	6,359	6,369
710	6,380	6,391	6,401	6,412	6,422	6,433	6,444	6,454	6,465	6,475
720	6,486	6,497	6,507	6,518	6,528	6,539	6,550	6,560	6,571	6,581
730	6,592	6,603	6,613	6,624	6,634	6,645	6,656	6,667	6,677	6,688
740	6,699	6,710	6,720	6,731	6,741	6,752	6,763	6,773	6,784	6,794
750	6,805	6,816	6,827	6,837	6,848	6,859	6,870	6,881	6,891	6,902,
760	6,913	6,924	6,934	6,945	6,955	6,966	6,977	6,988	6,998	7,009
770	7,020	7,031	7,042	7,052	7,063	7,074	7,085	7,096	7,106	7,117
780	7,128	7,139	7,150	7,160	7,171	7,182	7,193	7,204	7,214	7,225
790	7,230	7,247	7,258	7,269	7,280	7,291	7,302	7,313	7,323	7,334
800	7,345	7,356	7,367	7,377	7,388	7,399	7,410	7,421	7,432	7,443
810	7,454	7,465	7,476	7,486	7,497	7,508	7,519	7,530	7,541	7,552
820	7,563	7,574	7,585	7,596	7,607	7,618	7,629	7,640	7,650	7,661
830	7,672	7,683	7,694	7,705	7,716	7,727	7,738	7,749	7,760	7,771
840	7,782	7,793	7,804	7,815	7,826	7,837	7,848	7,859	7,870	7,881
850	7,892	7,903	7,914	7,926	7,937	7,948	7,959	7,970	7,981	7,992
860	8,003	8,014	8,025	8,036	8,047	8,058	8,069	8,080	8,092	8,103
870	8,114	8,125	8,136	8,147	8,158	8,169	8,180	8,191	8,203	8,214
880	8,225	8,236	8,247	8,259	8,270	8,281	8,292	8,303	8,314	8,325
890	8,336	8,347	8,358	8,370	8,381	8,392	8,403	8,414	8,426	8,437
900	8,448	8,459	8,470	8,482	8,493	8,504	8,515	8,526	8,538	8,549
910	8,560	8,571	8,583	8,594	8,606	8,617	8,628	8,639	8,651	8,662
920	8,673	8,684	8,695	8,707	8,718	8,729	8,740	8,752	8,763	8,775
930	8,786	8,797	8,808	8,820	8,831	8,842	8,853	8,865	8,876	8,888
940	8,899	8,910	8,922	8,933	8,945	8,956	8,967	8,978	8,990	9,001

Продолжение приложения Е

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
950	9,012	9,023	9,035	9,046	9,058	9,069	9,080	9,092	9,103	9,115
960	9,126	9,137	9,149	9,160	9,172	9,183	9,194	9,206	9,217	9,229
970	9,240	9,252	9,263	9,275	9,286	9,298	9,309	9,321	9,332	9,344
980	9,355	9,366	9,378	9,389	9,401	9,412	9,424	9,435	9,447	9,458
990	9,470	9,481	9,493	9,504	9,516	9,527	9,539	9,550	9,562	9,573
1000	9,585	9,596	9,608	9,619	9,631	9,642	9,654	9,665	9,677	9,688
1010	9,700	9,712	9,723	9,735	9,746	9,758	9,770	9,781	9,793	9,804
1020	9,816	9,828	9,839	9,851	9,862	9,874	9,886	9,897	9,909	9,920
1030	9,932	9,944	9,955	9,967	9,978	9,990	10,002	10,013	10,025	10,036
1040	10,048	10,060	10,072	10,083	10,095	10,107	10,119	10,130	10,142	10,153
1050	10,165	10,177	10,189	10,200	10,212	10,224	10,236	10,247	10,259	10,270
1060	10,282	10,294	10,306	10,317	10,329	10,341	10,353	10,365	10,376	10,388
1070	10,400	10,412	10,424	10,435	10,447	10,459	10,471	10,482	10,494	10,505
1080	10,517	10,529	10,541	10,552	10,564	10,576	10,588	10,600	10,611	10,623
1090	10,635	10,647	10,659	10,670	10,682	10,694	10,706	10,718	10,730	10,742
1100	10,754	10,766	10,778	10,789	10,801	10,813	10,825	10,837	10,848	10,860
1110	10,872	10,884	10,896	10,907	10,919	10,931	10,943	10,955	10,967	10,979
1120	10,991	11,003	11,015	11,026	11,038	11,050	11,062	11,074	11,086	11,098
1130	11,110	11,122	11,134	11,145	11,157	11,169	11,181	11,193	11,205	11,217
1140	11,229	11,241	11,253	11,264	11,276	11,288	11,300	11,312	11,324	11,336
1150	11,348	11,360	11,372	11,384	11,396	11,408	11,420	11,432	11,443	11,45
1160	11,467	11,479	11,491	11,503	11,515	11,527	11,539	11,551	11,563	11,575
1170	11,587	11,599	11,611	lli,623	11,635	11,647	11,659	11,671	11,683	11,695
1180	11,707	11,719	11,731	11,743	11,755	11,767	11,779	11,791	11,803	11,815
1190	11,827	11,839	11,851	11,863	11,875	11,887	11,899	11,911	11,923	11,935
1200	11,947	11,959	11,971	11,983	11,995	12,007	12,019	12,031	12,043	12,055
1210	12,067	12,079	12,091	12,104	12,116	12,128	12,140	12,152	12,164	12,176
1220	12,188	12,200	12,212	12,224	12,236	12,248	12,260	12,272	12,284	12,296
1230	12,308	12,320	12,332	12,345	12,357	12,369	12,381	12,393	12,405	12,417
1240	12,429	12,441	12,453	12,465	12,477	12,489	12,501	12,513	12,526	12,538
1250	12,550	12,562	12,574	12,586	12,598	12,610	12,622	12,634	12,647	12,659
1260	12,671	12,683	12,695	12,707	12,719	12,731	12,743	12,755	12,768	12,780
1270	12,792	12,804	12,816	12,828	12,840	12,852	12,864	12,876	12,889	12,901

Продолжение приложения Е

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
1280	12,913	12,925	12,937	12,949	12,961	12,973	12,985	12,997	13,010	13,022
1290	13,034	13,046	13,058	13,070	13,082	13,094	13,106	13,118	13,131	13,143
1300	13,155	13,167	13,179	13,192	13,204	13,216	13,228	13,240	13,252	13,264
1310	13,276	13,288	13,300	13,313	13,325	13,337	13,349	13,361	13,373	13,385
1320	13,397	13,409	13,421	13,434	13,446	13,458	13,470	13,482	13,495	13,507
1330	13,519	13,531	13,543	13,555	13,567	13,579	13,591	13,603	13,616	13,628
1340	13,640	13,652	13,664	13,677	13,689	13,701	13,713	13,725	13,737	13,749
1350	13,761	13,773	13,785	13,798	13,810	13,822	13,834	13,846	13,859	13,871
1360	13,883	13,895	13,907	13,919	13,931	13,943	13,955	13,967	13,980	13,992
1370	14,004	14,016	14,028	14,041	14,053	14,065	14,077	14,089	14,101	14,113
1380	14,125	14,137	14,149	14,162	14,174	14,186	14,198	14,210	14,223	14,235
1390	14,247	14,259	14,271	14,283	14,295	14,307	14,319	14,331	14,344	14,356
1400	14,368	14,380	14,392	14,405	14,417	14,429	14,441	14,453	14,465	14,477
1410	14,489	14,50	14,513	14,526	14,538	14,550	14,562	14,574	14,586	14,598
1420	14,610	14,622	14,634	14,647	14,659	14,671	14,683	14,695	14,707	14,719
1430	14,731	14,743	14,755	14,768	14,780	14,792	14,804	14,816	14,828	14,840
1440	14,852	14,864	14,876	14,889	14,901	14,913	14,925	14,937	14,949	14,96?
1450	14,973	14,985	14,997	15,010	15,022	15,034	15,046	15,058	15,070	15,082
1460	15,094	15,106	15,118	15,131	15,143	15,155	15,167	15,179	15,191	15,203
1470	15,215	15,227	15,239	15,251	15,263	15,275	15,287	15,299	15,312	15,324
1480	15,336	15,348	15,360	15,372	15,384	15,396	15,408	15,420	15,432	15,444
1490	15,456	15,468	15,480	15,492	15,504	15,516	15,528	15,540	15,552	15,564
1500	15,576	15,588	15,600	15,613	15,625	15,637	15,649	15,661	15,673	15,685
1510	15,697	15,709	15,721	15,733	15,745	15,757	15,769	15,781	15,793	15,805
1520	15,817	15,829	15,841	15,853	15,865	15,877	15,889	15,901	15,913	15,925
1530	15,937	15,949	15,961	15,973	15,985	15,997	16,009	16,021	16,033	16,045
1540	16,057	16,069	16,081	16,092	16,104	16,116	16,128	16,140	16,152	16,164
1550	16,176	16,188	16,200	16,212	16,224	16,236	16,248	16,260	16,272	16,284
1560	16,296	16,308	16,320	16,331	16,343	16,355	16,367	16,379	16,391	16,403
1570	16,415	16,427	16,439	16,450	16,462	16,474	16,486	16,498	16,510	16,522
1580	16,534	16,546	16,558	16,569	16,581	16,593	16,605	16,617	16,629	16,641
1590	16,653	16:665	16,677	16,688	16,700	16,712	16,724	16,736	16,747	16,759
1600	16,771									

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Градуировочная характеристика платинородий (30 %) – платинородиевой (6 %) термопары в диапазоне температур 300…1800 °С

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
300	0,431	0,434	0,437	0,440	0,443	0,446	0,449	0,452	0,456	0,459
310	0,462	0,465	0,468	0,472	0,475	0,478	0,481	0,484	0,488	0,491
320	0,494	0,497	0,500	0,504	0,507	0,510	0,513	0,517	0,520	0,524
330	0,527	0,530	0,534	0,537	0,541	0,544	0,547	0,551	0,554	0,558
340	0,561	0,564	0,568	0,571	0,575	0,578	0,582	0,585	0,589	0,592
350	0,596	0,600	0,603	0,607	0,610	0,614	0,618	0,621	0,625	0,628
360	0,632	0,636	0,639	0,643	0,646	0,650	0,654	0,658	0,661	0,665
370	0,669	0,673	0,677	0,680	0,684	0,688	0,692	0,696	0,699	0,703
380	0,707	0,711	0,715	0,719	0,723	0,727	0,731	0,735	0,738	0,742
390	0,746	0,750	0,754	0,758	0,762	0,766	0,770	0,774	0,778	0,782
400	0,786	0,790	0,794	0,799	0,803	0,807	0,811	0,815	0,819	0,823
410	0,827	0,831	0,835	0,840	0,844	0,848	0,852	0,857	0,861	0,866
420	0,870	0,874	0,878	0,883	0,887	0,891	0,895	0,900	0,904	0,909
430	0,913	0,917	0,922	0,926	0,931	0,935	0,939	0,944	0,948	0,953
440	0,957	0,961	0,966	0,970	0,975	0,979	0,984	0,988	0,993	0,997
450	1,002	1,007	1,011	1,016	1,020	1,025	1,030	1,034	1,039	1,043
460	1,048	1,053	1,057	1,062	1,066	1,071	1,076	1,081	1,085	1,090
470	1,095	1,100	1,105	1,109	1,114	1,119	1,124	1,129	1,133	1,138
480	1,143	1,148	1,153	1,157	1,162	1,167	1,172	1,177	1,182	1,187
490	1,192	1,197	1,202	1,206	1,211	1,216	1,221	1,226	1,231	1,236
500	1,241	1,246	1,251	1,257	1,262	1,267	1,272	1,277	1,282	1,287
510	1,292	1,297	1,302	1,308	1,313	1,318	1,323	1,328	1,334	1,339
520	1,344	1,349	1,354	1,360	1,365	1,370	1,375	1,381	1,386	1,392
530	1,397	1,402	1,407	1,413	1,418	1,423	1,428	1,434	1,439	1,445
540	1,450	1,455	1,461	1,466	1,472	1,477	1,483	1,488	1,494	1,499
550	1,505	1,510	1,516	1,521	1,527	1,532	1,538	1,543	1,549	1,554
560	1,560	1,566	1,571	1,577	1,582	1,588	1,594	1,600	1,605	1,611
570	1,617	1,623	1,628	1,634	1,639	1,645	1,651	1,657	1,662	1,668

Продолжение приложения Ж

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
580	1,674	1,680	1,686	1,691	1,697	1,703	1,709	1,715	1,720	1,726
590	1,732	1,738	1,744	1,750	1,756	1,762	1,768	1,774	1,779	1,785
600	1,791	1,797	1,803	1,809	1,815	1,821	1,827	1,833	1,839	1,845
610	1,851	1,857	1,863	1,870	1,876	1,882	1,888	1,894	1,900	1,906
620	1,912	1,918	1,924	1,931	1,93Г	1,943	1,949	1,955	1,962	1,968
630	1,974	1,980	1,986	1,993	1,999	2,005	2,011	2,017	2,024	2,030
640	2,036	2,042	2,049	2,055	2,062	2,068	2,074	2,081	2,087	2,094
650	2,100	2,106	2,113	2,119	2,126	2,132	2,138	2,145	2,151	2,158
660	2,164	2,171	2,177	2,184	2,190	2,197	2,204	2,210	2,217	2,223
670	2,230	2,237	2,243	2,250	2,256	2,263	2,270	2,276	2,283	2,289
680	2,296	2,303	2,309	2,316	2,322	2,329	2,336	2,343	2,349	2,356
690	2,363	2,370	2,376	2,383	2,389	2,396	2,403	2,410	2,416	2,423
700	2,430	2,437	2,444	2,451	2,458	2,465	2,472	2,479	2,485	2,492
710	2,499	2,506	2,513	2,520	2,527	2,534	2,541	2,548	2,555	2,562
720	2,569	2,576	2,583	2,590	2,597	2,604	2,611	2,618	2,625	2,632
730	2,639	2,646	2,653	2,660	2,667	2,674	2,681	2,688	2,696	2,703
740	2,710	2,717	2,724	2,732	2,739	2,746	2,753	2,760	2,768	2,775
750	2,782	2,789	2,796	2,804	2,811	2,818	2,825	2,833	2,840	2,848
760	2,855	2,862	2,870	2,877	2,885	2,892	2,899	2,906	2,9Н	2,921
770	2,928	2,936	2,943	2,951	2,958	2,966	2,973	2,981	2,988	2,996
780	3,003	3,010	3,018	3,025	3,033	3,040	3,048	3,055	3,063	3,070
790	3,078	3,086	3,093	3,101	3,108	3,116	3,124	3,131	3,139	3,146
800	3,154	3,162	3,169	3,177	3,184	3,192	3,200	3,208	3,215	3,223
810	3,231	3,239	3,246	3,254	3,261	3,269	3,277	3,285	3,292	3,300
820	3,308	3,316	3,324	3,331	3,339	3,347	3,355	3,363	3,371	3,379
830	3,387	3,395	3,403	3,410	3,418	3,426	3,434	3,442	3,450	3,458
840	3,466	3,474	3,482	3,490	3,498	3,506	3,514	3,522	3,530	3,538
850	3,546	3,554	3,562	3,570	3,578	3,586	3,594	3,602	3,610	3,618
860	3,626	3,634	3,642	3,651	3,659	3,667	3,675	3,683	3,692	3,700
870	3,708	3,716	3,724	3,733	3,741	3,749	3,757	3,765	3,774	3,782
880	3,790	3,798	3,806	3,815	2,823	3,831	3,839	3,848	3,856	3,865
890	3,873	3,882	3,891	3,899	3,907	3,915	3,923	3,932	3,940	3,949
900	3,957	3,965	3,974	3,982	3,991	3,999	4,007	4,016	4,024	4,033

Продолжение приложения Ж

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
910	4,041	4,049	4,058	4,066	4,075	4,083	4,092	4,100	4,109	4,117
920	4,126	4,135	4,143	4,152	4,160	4,169	4,178	4,186	4,195	4,203
930	4,212	4,221	4,229	4,237	4,246	4,255	4,264	4,272	4,281	4,289
940	4,298	4,307	4,316	4,324	4,333	4,342	4,351	4,360	4,368	4,3Г7
950	4,386	4,395	4,404	4,412	4,421	4,430	4,439	4,448	4,456	4,465
960	4,474	4,483	4,492	4,500	4,509	4,518	4,527	4,536	4,544	4,553
970	4,562	4,571	4,580	4,589	,4,598	4,607	4,616	4,625	4,634	4,643
980	4,652	4,661	4,670	4,679	4,688	4,697	,4,706	4,715	4,724	4,733
990	4,742	4,751	4,760	4,769	4,778	4,787	4,796	4,805	4,815	4,824
1000	4,833	4,842	4,851	4,861	4,870	4,879	4,888	4,897	4,907	4,916
1010	4,925	4,934	4,943	4,953	4,962	4,971	4,980	4,989	4,999	5,008
1020	5,017	5,026	5,035	5,045	5,054	5,063	5,072	5,082	5,091	5,101
1030	5,110	5,119	5,129	5,138	5,148	5,157	5,166	5,176	5,185	5,195
1040	5,204	5,213	5,223	5,232	5,242	5,251	5,260	5,270	5,279	5,289
1050	5,298	5,307	5,317	5,326	5,336	5,345	5,354	5,364	5,373	5,383
1060	5,392	5,402	5,411	5,421	5,430	5,440	5,450	5,459	5,469	5,478
1070	5,488	5,498	5,507	5,517	5,526	5,536	5,546	5,555	5,565	5,574
1080	5,584	5,594	5,603	5,613	5,622	5,632	5,642	5,651	5,661	5,670
1090	5,680	5,690	5,699	5,709	5,718	5,728	5,738	5,748	5,757	5,767
1100	5,777	5,787	5,797	5,806	5,816	5,826	5,836	5,846	5,855	5,865
1110	5,875	5,885	5,895	5,904	5,914	5,924	5,934	5,944	5,953	5,963
1120	5,973	5,983	5,993	6,003	6,013	6,023	6,033'	6,043	6,053	6,063
1130	6,073	6,083	6,893	6,102	6,112	6,122	6,132	6,142	6,152	6,162
1140	6,172	6,182	6,192	6,203	6,213	6,223	6,233	6,243	6,253	6,263
1150	6,273	6,283	6,293	6,303	6,313	6,323	6,333	6,343	6,354	6,364
1160	6,374	6,384	6,394	6,404	6,414	6,424	6,434	6,444	6,455	6,465
1170	6,475	6,485	6,495	6,506	6,516	6,526	6,536	6,546	6,557	6,567
1180	6,577	6,587	6,598	6,608	6,619	6,629	6,639	6,649	6,660	6,670
1190	6,680	6,690	6,701	6,711	6,722	6,732	6,742	6,752	6,763	6,773
1200	6,783	6,793	6,804	6,814	6,825	6,835	6,845	6,856	6,866	6,877
1210	6,887	6,897	,6,908	6,918	6,929	6,939	6,949	6,960	6,970	6,981
1220	6,991	7,002	7,012	7,023	7,033	7,044	7,054	7,065	7,075	7,086
1230	7,096	7,107	7,117	7,128	7,138	7,149	7,160	7,170	7,181	7,191

Продолжение приложения Ж

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
1240	7,202	7,213	7,223	7,234	7,244	7,255	7,266	7,276	7,287	7,297
1250	7,308	7,319	7,329	7,340	7,350	7,361	7,372	7,382	7,393	7,403
1260	7,414	7,425	7,435	7,446	7,456	7,467	7,478	7,489	7,499	7,510
1270	7,521	7,532	7,543	7,553	7,564	7,575	7,586	7,596	7,607	7,617
1280	7,628	7,639	7,650	7,660	7,671	7,682	7,693	7,704	7,714	7,725
1290	7,736	7,747	7,758	7,768	7,779	7,790	7,801	7,812	7,823	7,834
1300	7,845	7,856	7,867	7,877	7,888	7,899	,7,910	7,921	7,931	7,942
1310	7,953	7,964	7,975	7,986	7,997	8,008	8,019	8,030	8,041	8,052
1320	8,063	8,074	7,085	8,086	8,107	8,118	8,129	8,140	8,150	8,161
1330	8,172	8,183	8,194	8,205	8,216	8,227	8,238	8,249	8,261	8,272
1340	8,283	8,294	8,305	8,316	8,327	8,338	8,349	8,360	8,371	8,382
1350	8,393	8,404	8,415	8,427	8,438	8,449	8,460	8,471	8,482	8,493
1360	8,504	8,515	8,526	8,538	8,549	8,560	8,571	8,582	8,594	8,605
1370	8,616	8,627	8,638	8,649	8,660	8,671	8,682	8,693	8,705	8,716
1380	8,727	8,738	8,749	8,761	8,772	8,783	8,794	8,805	8,817	8,828
1390	8,839	8,850	8,862	8,873	8,885	8,896	8,907	8,918	8,930	8,941
1400	8,952	8,963	8,974	8,986	8,997	9,008	9,020	9,031	9,043	9,054
1410	9,065	9,076	9,087	9,099	9,110	9,121	9,132	9,144	9,155	9,167
1420	9,178	9,189	9,201	9,212	9,224	9,235	9,246	9,257	9,269	9,280
1430	9,291	9,302	9,314	9,325	9,337	9,348	9,359	9,371	9,382	9,394
1440	9,405	9,416	9,428	9,439	9,451	9,462	9,473	9,485	9,496	9,508
1450	9,519	9,531	9,542	9,554	9,565	9,577	9,588	9,600	9,611	9,623
1460	9,634	9,645	9,657	9,668	9,680	9,691	9,703	9,714	9,726	9,737
1470	9,749	9,760	9,772	9,783	9,795	9,806	9,817	9,829	9,840	9;852
1480	9,863	9,875	9,886	9,898	9,909	9,921	9,933	9,944	9,956	9,967
1490	9,979	9,990	10,002	10,013	10,025	10,036	10,048	10,059	10,071	10,082
1500	10,094	10,106	10,117	10,129	10,140	10,152	10,164	10,175	10,187	10,198
1510	10,210	10,222	10,233	10,245	10,256	10,268	10,279	10,291	10,302	10,314
1520	10,325	10,337	10,348	10,360	10,371	10,383	10,395	10,406	10,418	10,429
1530	10,441	10,453	10,465	10,476	10,488	10,500	10,512	10,523	10,535	10,546
1540	10,558	10,570	10,581	10,593	10.604	10,616	10,628	10,639	10,651	10,663
1550	10,674	10,686	10,697	10,709	10,720	10,732	10,744	10,755	10,767	10,778
1560	10,790	10,802	10,814	10,825	10,837	10,849	10,861	10,872	10,884	10,895

Продолжение приложения Ж

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
1570	10,907	10,919	10,930	10,942	10,953	10,965	10,977	10,989	11,000	11,012
1580	11,024	11,036	11,047	11,059	11,070	11,082	11,094	11,106	11,117	11,129
1590	11,141	11,153	11,164	11,176	11,187	11,199	11,211	11,222	11,234	11,245
1600	11,257	11,269	11,281	11,292	11,304	11,316	11,328	11,339	11,351	11,362
1610	11,374	11,386	11,398	11,409	11,421	11,433	11,445	11,456	11,468	11,479
1620	11,491	11,503	11,515	11,526	11,538	11,550	11,562	11,573	11,585	11,596
1630	11,608	11,620	11,632	11,643	11,655	11,667	11,679	11,690	11,702	11,713
1640	11,725	11,737	11,749	11,760	11,772	11,784	11,796	11,807	11,819	11,830
1650	11,842	11,854	11,866	11,877	11,889	11,901	11,913	11:924	11,936	11,947
1660	11,959	11,971	11,983	11,994	12,006	12,018	12,030	12,041	12,053	12,064
1670	12,076	12,088	12,099	12,111	12,122	12,134	12,146	12,158	12,169	12,181
1680	12,193	12,205	12,216	12.228	12,239	12,251	12,263	12,275	12,286	12,298
1690	12,310	12,322	12,333	12,345	12,356	12,368	12,380	12,391	12,403	12,414
1700	12,426	12,438	12,450	12,461	12,473	12,485	12,497	12,508	12,520	12,531
1710	12,543	12,555	12,566	12,578	12,589	12,601	12,613	12,624	12,636	12,647
1720	12,659	12,671	12,683	12,694	12,706	12,718	12,730	12,741	12,753	12,764
1730	12,776	12,788	12,799	12,811	12,823	12,834	12,846	12,857	12,869	12,880
1740	12,892	12,904	12,915	12,927	12,938	12,950	12,962	12,973	12,985	12,996
1750	13,008	13,020	13,031	13,043	13,054	13,066	13,078	13,089	13,101	13,112
1760	13,124	13,135	13,147	13,158	13,170	13,181	13,193	13,204	13,216	13,227
1770	13,239	13,251	13,262	13,274	13,285	13,297	13,309	13,320	13,332	13,343
1780	13,355	13,366	13,378	13,389	13,401	13,412	13,424	13,435	13,447	13,458
1790	13,470	13,481	13,493	13,504	13,616	13,527	13,539	13,550	13,562	13,573
1800	13,585									

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Градуировочная характеристика вольфрамрений (5 %) – вольфрамрениевой (20 %) термопары в диапазоне температур 0…2500°С

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,000	0,013	0,025	0,037	0,050	0,062	0,074	0,087	0,099	0,111
10	0,124	0,136	0,149	0,161	0,174	0,186	0,199	0,211	0,224	0,237
20	0,250	0,263	0,275–	0,288	0,301	0,314	0,327	0,339	0,352	0,365
30	0,378	0,391	0,404	0,417	0,430	0,443	0,456	0,469	0,482	0,495
40	0,508	0,521	0,534	0,548	0,561	0,574	0,587	0,600	0,613	0,627
50	0,640	0,653	0,666	0,680	0,693	0,707	0,720	0,734	0,747	0,761
60	0,774	0,788	0,801	0,815	0,828	0,842	0,855	0,869	0,882	0,896
70	0,910	0,924	0,938	0,951	0,965	0,979	0,993	1,007	1,020	1,034
80	1,048	1,062	1,076	1,090	1,104	1,118	1,132	1,146	1,160	1,174
90	1,188	1,202	1,216	1,231	1,245	1,259	1,273	1,287	1,302	1,316
100	1,330	1,344	1,359	1,373	1,388	1,402	1,417	1,431	1,446	1,460
110	1,475	1,489	1,504	1,519	1,534	1,548	1,563	1,578	1,593	1,607
120	1,622	1,637	1,652	1,667	1,682	1,697	1,711	1,726	1,741	1,756
130	1,771	1,786	1,801	1,816	1,831	1,846	1,862	1,877	1,892	1,907
140	1,922	1,937	1,953	1,968	1,983	1,998	2,014	2,029	2,044	2,059
150	2,075	2,090	2,106	2,121	2,137	2,152	2,168	2,183	2,199	2,214
160	2,230	2,246	2,261	2,277	2,293	2,308	2,324	2,340	2,355	2,371
170	2,387	2,403	2,419	2,435	2,451	2,466	2,482	2,498	2,514	2,530
180	2,546	2,562	2,588	2,594	2,610	2,626	2,643	2,659	2,675	2,691
190	2,707	2,723	2,739	2,755	2,772	2,788	2,804	2,820	2,836	2,853
200	2,869	2,885	2,901	2,918	2,934	2,950	2,967	2,983	2,999	3,016
210	3,032	3,048	3,065	3,081	3,097	3,114	3,130	3,146	3,163	3,179
220	3,195	3,212	3,228	3,244	8,261	3,277	3,293	3,310	3,326	3,342
230	3,359	3,375	3,391	3,408	3,424	3,441	3,457	3,474	3,490	3,507
240	3,523	3,540	3,556	3,573	3,589	3,606	3,622	3,639	3,655	3,672
250	3,688	3,705	3,721	3,738	3,754	3,771	3,787	3,804	3,820	3,837
260	3,853	3,807	3,886	3,903	3,919	3,936	3,952	3,969	3,985	4,002
270	4,019	4,035	4,052	4,069	4,085	4,102	4,119	4,135	4,152	4,169

Продолжение приложения 3

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
280	4,185	4,202	4,219	4,235	4,252	4,269	4,285	4,302	4,319	4,335
290	4,352	4,369	4,385	4,402	4,419	4,435	4,452	4,469	4,485	4,502
300	4,519	4,536	4,553	4,569	4,586	4,603	4,620	4,637	4,653	4,670
310	4,687	4,704	4,721	4,737	4,754	4,771	4,788	4,805	4,821	4,838
320	4,855	4,872	4,889	4,906	4,923	4,939	4,956	4,973	4,990	5,007
330	5,024	5,041	5,058	5,075	5,092	5,108	5,125	5,142	5,159	5,176
340	5,193	5,210	5,227	5,244	5,261	5,277	5,294	5,311	5,328	5,345
350	5,362	5,379	5,396	5,413	5,430	5,446	5,463	5,480	5,497	5,514
360	5,531	5,548	5,565	5,582	5,599	5,615	5,632	5,649	5,666	5,683
370	5,700	5,717	5,734	5,751	5,768	5,784	5,801	5,818	5,835	5,852
380	5,869	5,886	5,903	5,920	5,937	5,954	5,971	5,988	6,005	6,022
390	6,039	6,056	6,073	,6,090	6,107	6,124	6,141	6,158	6,175	6,192
400	6,209	6,226	6,243	6,260	6,277	6,294	6,311	6,328	6,345	6,362
410	6,379	6,396	6,413	6,430	6,447	6,464	6,481	6,498	6,515	6,532
420	6,549	6,566	6,583	6,600	6,617	6,634	6,651	6,668	6,685	6,702
430	6,719	6,736	6,753	6,770	6,787	6,804	7,821	6,838	6,855	6,872
440	6,884	6,906	6,923	6,940	6,957	6,974	6,991	7,008	7,025	7,042
450	7,059	7,076	7,093	7,110	7,127	7,144	7,161	7,178	7,195	7,212
460	7,229	7,246	7,263	7,280	7,297	7,314	7,331	7,348	7,365,	7,382
470	7,399	7,416	7,433	7,450	7,467	7,484	7,501	7,518	7,535	7,552
480	7,569	7,586	7,603	7,620	7,637	7,654	7,671	7,688	7,705	7,222
490	7,739	7,756	7,773	7,790	7,807	7,824	7,841	7,858	7,875	7,892
500	7,909	7,926	7,943	7,960	7,977	7,994	8,010	8,027	8,044	8,061
510	8,078	8,095	8,112	8,129	8,146	8,163	8,180	8,196	8,213	8,230
520	8,247	8,264	8,281	8,298	8,315,	8,332	8,348	8,365	8,382	8,399
530	8,416	8,433	8,450	8,467	8,484	8,501	8,517	8,534	8,551	8,568
540	8,585	8,602	8,619	8,636	8,653	8,670	8,686	8,703	8,720	8,737
550	8,754	8,771	8,788	8,805	8,822	8,839	8,855	8,872	8,889	8,906
560	8,923	8,940	8,957	8,974	8,991	9,008	9,024	9,041	9,058	9,075
570	9,092	9,109	9,126	9,143	9,160	9,177	9,193	9,210	9,227	9,244
580	9,261	9,278	9,295 i	9,312	9,329	9,346	9,362	9,379	9,396	9,413
590	9,430	9,446	9,463	9,480	9,497	9,514	9,531	9,548	9,565	9,, 582
600	9,598	9?615	9,632	9,648	9,665	9,682	9,698	9,715	9,732	9,748

Продолжение приложения 3

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
610	9,765	9,782	9,799	9,815	9,832	9,849	9,866	9,882	9,899	9,916
620	9,933	9,950	9,966	9,983	10,000	10,017	10,034	10,050	10,067	10,084
630	10,101	10,118	10,134	10,151	10,168	10,185	10,202	10,218	10,235	10,252
640	10,269	10,286	10,302	10,319	10,336	10,353	10,370	10,386	10,403	10,420
650	10,437	10,454	10,470	10,487	10,504	10,521	10,538	10,554	10,571	10,588
660	10,605	10,622	10,638	10,655	10,672	10,688	10,705	10,722	10,738	10,755
670	10,772	10,789	10,805	10,822	10,839	10,855	10,872	10,889	10,905	10,922
680	10,939	10,956	10,972	10,989	11,006	11,022	11,039	11,056	11,072	11,089
690	11,106	11,123	11,139	11,156	11,173	11,189	11,206	11,223	11,239	11,256
700	11,273	11,290	11,306	11,323	11,340	11,356	11,373	11,390	11,406	11,423
710	11,440	11,456	11,473	11,490	11,506	11,523	11,540	11,556	11,573	11,590
720	11,606	11,622	11,639	11,656	11,672	11,689	11,706	11,722	11,739	11,756
730	11,772	11,788	11,805	11,822	Ц,838	11,855	11,872	11,888	11,905	11,922
740	11,939	11,954	11,971	11,988	12,004	12,021	12,038	12,054	12,071	12,088
750	12,104	12,121	12,137	12,154	12,170	12,187	12,203	12,220	12,236	12,253
760	12,269	12,286	12,302	12,319	12,335	12,352	12,368	12,385	12,401	12,418
770	12,434	12,451	12,467	12,484	12,500	12,517	12,533	12,550	12,566	12,583
780	12,599	12,616	12,632	12,649	12,665	12,682	12,698	12,715	12,731	12,748
790	12,764	12,781	12,797	12,814	12,830	12,847	12,863	12,880	12,896	12,913
800	12,929	12,945	12,962	12,978	12,995	13,011	13,027	13,044	13,060	13,077
810	13,093	13,109	13,126	13,142	13,159	13,175	13,191	13,208	13,224	13,241
820	13,257	13,273	13,290	13,306	13,323	13,339	13,355	13,372	13,388	13,405
830	13,421	13,437	13,453	13,470	13,486	13,502	13,519	13,535	13,155	13,568
840	13,584	13,600	13,616	13,633	13,659	13,665	13,682	13,698	13,714	13,731
850	13,747	13,763	13,779	13,796	13,812	13,828	13,845	13,861	13,877	13,894
860	13,910	13,926	13,942	13,959	13,975	13,991	14,007	14,023	14,040	14,056
870	14,072	14,088	14,104	14,121	14,137	14,153	14,169	14,185	14,202	14,218
880	14,234	14,250	14,266	14,282	14,298	14,314	14,331	14,347	14,363	14,379
890	14,395	14,411	14,427	14,443	14,459	14,475	14,392	14,508	14,524	14,540
900	14,556	14,572	14,588	14,604	14,620	14,636	14,652	14,668	14,684	14,700
910	14,716	14,732	14,748	14,764	14,780	14,796	14,812	14,828	14,844	14,860
920	14,876	14,892	14,908	14,924	14,940	14,956	14,971	14,987	15,003	15,019
930	15,035	15,051	15,067	15,08а	15,099	15,115	15,130	15,146	15,162	15,178

Продолжение приложения 3

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
940	15,194	15,210	15,226	15,241	15,257	15,273	15,289	15,305	15,320	15,336
950	15,352	15,368	15,384	15,399	15,415	15,431	15,447	15,463	15,478	15,494
960	15,510	15,526	15,542	15,557	15,572	15,588	15,603	15,619	15,635	15,651
970	15,665	15,683	15,698	15,714	15,730	15,745	15,761	15,777	15,792	15,808
980	15,824	15,839	15,855	15,871	J5,886	15,902	15,918	15,933	15,949	15,965
990	15,980	15,995	16,011	16,027	16,042	16,058	16,074	16,089	16,105	16,121
1000	16,136	16,152	16,167	16,183	16,198	16,214	16,229	16,245	16,260	16,276
1010	16,291	16,307	16,322	16,338	16,353	16,369	16,384	16,400	16,415	16,431
1020	16,446	16,462	16,477	16,492	16,508	16,523	16,538	16,554	16,569	16,584
1030	16,600	16,616	16,631	16,646	16,662	16,677	16,692	16,708	16,723	16,738
1040	16,754	16,769	16,784	16,800	16,815	16,830	16,846	16,861	16,876	16,892
1050	16,907	16,922	16,938	16,953	16,968	16,984	16,999	17,014	17,030	17,045
1060	17,060	17,075	17,090	17,106	17,121	17,136	17,151	17,166	17,182	17,197
1070	17,212	17,227	17,242	17,258	17,273	17,288	17,303	17,318	17,334	17,349
1080	17,364	17,379	17,394	17,409	17,424	17,439	17,455	17,470	17,485	17,500
1090	17,515	17,530	17,545	17,560	17,575	17,590	17,606	17,621	17,636	17,651
1100	17,666	17,681	17,696	17,711	17,726	17,741	17,756	17,771	17,786	17,801
1110	17,816	17,831	17,846	17,861	17,876	17,891	17,906	17,921	17,936	17,951
1120	17,966	17,981	17,996	18,011	18,026	18,041	18,055	18,070	18,085	18,100
1130	18,115	18,130	18,145	18,160	18,175	18,190	18,204	18,219	18,234	18,249
1140	18,264	18,279	18,294	18,308	18,323	18,338	18,353	18,368	18,382	18,397
1150	18,412	18,427	18,442	18,456	18,471	18,486	18,501	18,516	18,530	18,545
1160	18,560	18,575	18,589	18,604	18,619	18,634	18,648	18,663	18,678	18,693
1170	18,707	18,722	18,737	18,751	18,766	18,781	18,795	18,810	18,825	18,839
1180	18,854	18,869	18,883	18,898	18,913	18,927	18,942	18,957	18,971	18,986
1190	19,000	19,015	19,029	19,044	19,059	19,073	19,088	19,103	19,117	19,132
1200	19,146	19,161	19,175	19,190	19,204	19,219	19,233	19,248	19,262	19,277
1210	19,291	19,306	19,320	19,335	19,349	19,364	19,378	19,393	19,407	19,422
1220	19,436	19,450	19,465	19,479	19,493	19,508	19,522	19,536	19,551	19,565
1230	19,580	19,594	19,609	19,623	19,637	19,652	19,666	19,680	19,695	19,709
1240	19,724	19,738	19,752	19,767	19,781	19,795	19,810	19,824	19,838	19,853
1250	19,867	19,881	19,896	19,910	19,924	19,939	19,953	19,967	19,982	19,9?6
1260	20,010	20,024	20,038	20,053	20,067	20,081	20,095	20,109	20,124	20,138

Продолжение приложения 3

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
1270	20,152	20,166	20,180	20,195	20,209	20,223	20,237	20,251	20,266	20,280
1280	20,294	20,308	20,322	20,336	20,350	20,364	20,379	20,393	20,407	20,421
1290	20,435	20,449	20,463	20,477	20,491	20,505	20,520	20,534	20,548	20,562
1300	20,576	20,590	20,604	20,618	20,632	20,646	20,660	20,674	20'688	20,702
1310	20,716	20,730	20,744	20,758	20,772	20,786	20,800	20,814	20,828	20,842
1320	20,856	20,870	20,884	20,898	20,912	20,926	20,940	20,954	20,968	20,982
1330	20,996	21,010	21,024	21,038	21,052	21,066	21,079	21,093	21,107	21,121
1340	21,135	21,149	21,163	21,177	21,191	21,205	21,218	21,232	21,246	21,260
1350	21,264	21,288	21,302	21,316	21,330	21,344	21,357	21,371	21,385	21,399
1360	21,413	21,427	21,441	21,454	21,468	21,482	21,496	21,510	21,623	21,537
1370	21,551	21,565	21,579	21,592	21,606	21,620	21,634	21,648	21,661	21,675
1380	21,689	21,703	21,716	21,730	21,744	21,757	21,771	21,785	21,798	21,812
1390	21,826	21,840	21,853	21,867	21,881	21,894	21,908	21,922	21,935	21,949
1400	21,963	21,976	21,990	22,004	22,017	22,031	22,045	22,058	22,072	22,086
1410	22,099	22,113	22,127	22,140	22,154	22,168	22,181	22,195	22,208	22,222
1420	22,235	22,249	22,262	22,276	22,289	22,303	22,316	22,330	22,343	22,357
1430	22,370	22,384	22,397	22,411	22,424	22,438	22,451	22,465	22,478	22,492
1440	22,505	22,519	22,532	22,545	22,559	22,572	22,585	22,599	22,612	22,625
1450	22,639	22,653	22,666	22,679	22,693	22,706	22,719	22,733	22,746	22,759
1460	22,773	22,786	22,799	22,813	22,826	22,839	22,853	22,866	22,879	22,893
1470	22,906	22,919	22,933	22,946	22,959	22,973	22,986	22,999	23,013	23,026
1480	23,039	23,052	23,065	23,079	23,092	23,105	23,118	23,131	23,145	23,158
1490	23,171	23,184	23,197	23,211	23,224	23,237	23,250	23,263	23,277	23,290
1500	23,303	23,316	23,329	23,342	23,355	23,368	23,382	23,395	23,408	23,421
1510	23,434	23,447	23,460	23,473	23,486	23,499	23,513	23,526	23,539	23,552
1520	23,565	23,578	23,591	23,604	23,617	23,630	23,643	23,656	23,669	23,682
1530	23,695	23,708	23,721	23,734	23,747	23,760	23,773	23,786	23,799	23,812
1540	23,825	23,838	23,851	23,864	23,877	23,890	23,902	23,915	23,928	23,941
1550	23,954	23,967	23,980	23,^93	24,006	24,019	24,031	24,044	24,057	24,070
1560	24,083	24,096	24,109	24,121	24,134	24,147	24,160	24,173	24,185	24,198
1570	24,211	24,224	24,237	24,249	24,262	24,275	24,287	24,300	24,313	24,325
1580	24,338	24,350	24,363	24,376	24,388	24,401	24,414	24,426	24,439	24,452
1590	24,464	24,476	24,489	24,502	24,514	24,527	24,540	24,552	24,565	24,578

Продолжение приложения 3

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
1600	24,590	24,603	24,615	24,628	24,640	24,653	24,665	24,678	24,690	24,703
1610	24,715	24,728	24,740	24,753	24,765	24,778	24,790	24,803	24,815	24,828
1620	24,840	24,853	24,865	24,877	24,8?0	24,902	24,914	24,927	24,939	24,951
1630	24,964	24,977	24,989	25,001	25,014	25,026	25,038	25,051	25,063	25,075
1640	25,088	25,100	25,112	25,125	25,137	25,149	25,162	25,174	25,186	25,199
1650	25,211	25,223	25,235	25,248	25,260	25,272	25,285	25,297	25,309	25,322
1660	25,334	25,346	25,358	25,371	25,383	25,395	25,407	25,419	25,432	25,444
1670	25,456	25,468	25,480	25,493	25,505	25,517	25,529	25,541	25,554	25,566
1680	25,578	25,590	25,602	25,614	25,626	25,638	25,651	25,663	25,675	25,687
1690	25,699	25,711	25,723	25,735	25,747	25,759	25,772	25,784	25,796	25,808
1700	25,820	25,832	25,844	25,856	25,868	25,880	25,892	25,904	25,916	25,928
1710	25,940	25,952	25,964	25,976	25,988	26,000	26,012	26,024	26,036	26,048
1720	26,060	26,072	26,084	26,096	26,108	26,120	26,131	26,143	26,155	26,167
1730	26,179	26,191	26,203	26,215	26,227	26,239	26,250	26,262	26,274	26,286
1740	26,298	26,310	26,322	26,333	26,345	26,357	26,369	26,381	26,392	26,404
1750	26,416	26,428	26,440	26,451	26,463	26,475	26,487	26,499	26,510	26,522
1760	26,534	26,546	26,558	26,569	26,581	26,593	26,604	26,616	26,628	26,639
1770	26,651	26,663	26,674	26,686	26,698	26,709	26,721	26,733	26,744	26,756
1780	26,768	26,779	26,791	26,803	26,814	26,826	26,838	26,849	26,861	26,873
1790	26,884	26,896	26,907	26,919	26,930	26,942	26,953	26,965	26,976	26,988
1800	26,999	27,011	27,022	27,033	27,045	27,056	27,067	27,079	27,090	27,101
1810	27,113	27,124	27,135	27,147	27,158	27,169	27,181	27,192	27,203	27,215
1820	27,226	27,237	27,248	27,260	27,271	27,282	27,294	27,305	27,316	27,368
1830	27,339	27,350	27,361	27,372	27,383	27,395	27,406	27,417	27,428	27,439
1840	27,451	27,462	27,473	27,484	27,495	27,507	27,518	27,529	27,540	27,551
1850	27,563	27,574	27,585	27,596	27,607	27,619	27,630	27,641	27,652	27,663
1860	27,675	27,686	27,697	27,708	27,719	27,730	27,742	27,753	27,764	27,775
1870	27,786	27,797	27,808	27,819	27,830	27,841	27,853	27,864	27,875	27,886
1880	27,897	27,908	27,919	27,930	27,941	27,952	27,963	27,974	27,985	27,996
1890	28,007	28,018	28,029	28,040	28,051	28,062	28,073	28,084	28,095	28,106
1900	28,117	28,128	28,139	28,150	28,161	28,171	28,182	28,193	28,204	28,215
1910	28,226	28,237	28,248	28,259	28,270	28,280	28,291	28,302	28,313	28,324
1920	28,334	28,345	28,356	28,367	28,378	28,388	28,399	28,410	28,421	28,432

Продолжение приложения 3

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
1930	28,442	28,453	28,464	28,474	28,485	28,496	28,605	28,517	28,528	28,538
1940	28,549	28,560	28,571	28,581	28,592	28,603	28,613	28,624	28,635	28,645
1950	28,656	28,666	28,677	28,688	28,698	28,709	28,720	28,730	28,741	28,752
1960	28,762	28,773	28,783	28,794	28,804	28,815	28,825	28,836	28,846	28,857
1970	28,867	28,877	28,888	28,898	28,909	28,919	28,930	28,940	28,951	28,961
1980	28,971	28,981	28,991	29,002	29,012	29,022	29,033	29,043	29,053	29,064
1990	29,074	29,084	29,094	29,104	29,114	29,125	29,135	29,145	29,155	29,165
2000	29,177	29,187	29,197	29,207	29,217	29,228	29,238	29,248	29,258	29,268
2010	29,279	29,289	29,299	29,309	29,319	29,330	29,340	29,350	29,360	29,370
2020	29,381	29,391	29,401	29,411	29,421	29,432	29,442	29,452	29,462	29,472
2030	29,483	29,493	29,503	29,513	29,523	29,533	29,544	29,554	29,564	29,574
2040	29,584	29,594	29,604	29,614	29,624	29,634	29,645	29,655	29,665	29,675
2050	29,685	29,695	29,705	29,715	29,725	29,735	29,746	29,756	29,766	29,776
2060	29,786	29,796	29,806	29,816	29,826	29,836	29,846	29,856	29,866	29,876
2070	29,886	29,896	29,906	29,916	29,926	29,936	29,946	29,956	29,966	29,976
2080	29,986	29,996	30,006	30,016	30,026	30,036	30,046	30,056	30,066	30,076
2090	30,086	30,096	30,106	30,116	30,126	30,136	30,145	30,155	30,165	30,175
2100	30,185	30,195	30,205	30,215	30,225	30,234	30,244	30,254	30,264	30,274
2110	30,284	30,294	30,304	30,313	30,323	30,333	30,343	30,353	30,362	30,372
2120	30,382	30,392	30,402	30,411	30,421	30,431	30,441	30,451	30,460	30,469
2130	30,479	30,488	30,498	30,508	30,517	30,527	30,537	30,546	30,556	30,566
2140	30,575	30,585	30,594	30,604	30,613	30,623	30,632	30,642	30,651	30,661
2150	30,670	30,680	30,?89	30,699	30,?08	30,718	30,727	30,737	30,746	30,756
2160	30,765	30,775	30,784	30,793	30,803	30,812	30,821	30,831	30,840	30,849
2170	30,859	30,868	30,877	30,887	30,896	30,905	30,915	30,924	30,933	30,943
2180	30,952	30,961	30,977	30,979	30,988	30,998	31,007	31,016	31,025	31,034
2190	31,044	31,053	31,062	31,071	31,080	31,090	31,099	31,108	31,117	31,126
2200	31,136	31,145	31,154	31,163	31,172	31,181	31,190	31,200	31,209	31,218
2210	31,227	31,236	31,245	31,254	31,263	31,272	31,282	31,291	31,300	31,309
2220	31,318	31,327	31,336	31,345	31,354	31,363	31,372	31,381	31,390	31,399
2230	31,408	31,417	31,426	31,435	ЗН444	31,453	31,462	31,471	31,480	31,489
2240	31,498	31,507	31,516	31,525	31,534	31,542	31,551	31,560	31,569	31,578
2250	31,587	31,596	31,605	31,614	31,623	31,631	31,640	31,649	31,658	31,667

Продолжение приложения 3

Температура рабочего конца, °С	Термоэлектродвижущая сила, мВ									
	0	l	2	3	4	5	6	7	8	9
2260	31,676	31,685	31,694	31,702	31,711	31,720	31,729	31,738	31,746	31,755
2270	31,764	31,773	31,782	31,791	31,799	31,808	31,817	31,826	31,834	31,843
2280	31,852	31,861	31,870	31,878	31,887	31,896	31,904	31,913	31,921	31,930
2290	31,939	31,948	31,957	31,965	31,974	31,983	31,991	32,000	32,009	32,017
2300	32,026	32,034	32,043	32,052	32,060	32,069	32,078	32,086	32,095	32,104
2310	32,112	32,121	32,129	32,138	32,146	32,155	32,163	32,172	32,180	32,189
2320	32,197	32,206	32,214	32,222	32,231	32,239	32,247	32,256	32,264	32,272
2330	32,281	32,290	32,298	32,306	32,315	32,323	32,331	32,340	32,348	32,356
2340	32,365	32,374	32,383	32,392	32,400	32,408	32,417	32,425	32,433	32,441
2350	32,448	32,456	32,464	32,473	32,481	32,489	32,498	32,506	32,514	32,523
2360	32,531	32,539	32,547	32,555	32,563	32,572	32,580	32,588	32,596	32,604
2370	32,613	32,621	32,639	32,637	32,645	32,654	32,662	32,670	32,678	32,686
2380	32,695	32,703	32,711	32,719	32,727	32,736	32,744	32,752	32,760	32,768
2390	32,776	32,784	32,792	32,800	32,808	32,817	32,825	32,833	32,841	32,849
2400	32,857	32,865	32,873	32,881	32,889	32,897	32,905	32,913	32,921	32,929
2410	32,937	32,945	32,953	32,961	32,969	32,977	32,985	32,993	33,001	33,009
2420	33,017	33,025	33,033	33,041	33,049	33,066	33,064	33,072	33,080	33,088
2430	33,096	33,104	33,112	33,120	33,128	33,135	33,143	33,151	33,159	33,167
2440	33,175	33,183	33,191	33,199	33,207	33,214	33,222	33,230	33,238	33,246
2450	33,253	33,261	33,269	33,277	33,285	33,292	33,300	33,308	33,316	33,324
2460	33,331	33,339	33,347	33,354	33,362	33,370	33,377	33,385	33,393	33,400
2470	33,408	33,416	33,424	33,431	33,439	33,447	33,454	33,462	33,470	33,447
2480	33,485	33,492	33,500	33,508	33,515	33,523	33,531	33,538	33,546	33,554
2490	33,561	33,569	33,576	33,584	33,591	33,599	33,606	33,614	33,621	33,629
2500	33,636									

ПРИЛОЖЕНИЕ И

Градуировочная таблица проволочных термометров сопротивления

Температура Т, °С	Платиновые			Медные	
	гр.20	гр. 21	гр. 22	гр. 23	гр. 24
	Сопротивление, Ом				
–50	8,00	36,80	80,00	41,71	78,70
–40	8,40	38,65	84,03	43,97	82,96
–30	8,80	40,50	88,04	46,23	87,22
–20	9,20	42,34	92,04	48,48	91,48
–10	9,60	44,17	96,03	50,74	95,74
0	10,00	46,00	100,00	53,00	100,00
10	10,40	47,82	103,96	55,26	104,26
20	10,79	49,64	107,91	57,52	108,52
30	11,18	51,45	111,85	59,77	112,78
40	11,58	53,26	115,78	62,03	117,04
50	11,97	55,06	119,70	64,99	121,30
60	12,36	56,86	123,60	66,55	125,56
70	12,75	58,65	127,49	68,81	129,82
80	13,14	60,43	131,37	71,06	134,08
90	13,52	62,21	135,24	73,32	138,34
100	13,91	63,99	139,10	75,58	142,60
110	14,29	65,76	142,95	77,84	146,86
120	14,68	67,52	146,78	80,09	151,12
130	15,06	69,28	150,60	82,35	155,38
140	14,44	71,03	154,41	84,61	159,64
150	15,82	72,78	158,21	86,87	163,90
160	16,20	74,52	162,00	89,13	168,16
170	16,58	76,26	165,78	91,38	172,42
180	16,95	77,99	169,54	93,'б4	176,68
190	17,33	79,71	173,29	—	—
200	17,70	81,43	177,03	—	—

ПРИЛОЖЕНИЕ К

Давление и плотность насыщенных водяных паров

t, °C	Давление		$\rho_{макс}$, г/м^3	t, °C	Давление		$\rho_{макс}$, г/м^3
	кПа	мм.рт.ст.			кПа	мм.рт.ст.	
–5	0,401	3,01	3,25	12	1,401	10,51	10,67
–4	0,427	3,28	3,53	13	1,497	11,23	11,36
–3	0,463	3,47	3,83	14	1,597	11,98	12,08
–2	0,517	3,88	4,14	15	1,704	12,78	12,84
–1	0,563	4,22	4,49	16	1,817	13,63	13,65
0	0,611	4,58	4,85	17	1,937	14,53	14,50
1	0,656	4,92	5,20	18	2,062	15,47	15,39
2	0,705	5,59	5,57	19	2,196	16,47	16,32
3	0,757	5,68	5,95	20	2,337	17,53	17,32
4	0,813	6,10	6,37	21	2,486	18,65	18,35
5	0,872	6,54	6,80	22	2,642	19,82	19,44
6	0,935	7,01	7,27	23	2,809	21,07	20,60
7	1,005	7,54	7,79	24	2,984	22,38	21,81
8	1,072	8,04	8,28	25	3,168	23,76	23,07
9	1,148	8,61	8,83	26	3,361	25,21	24,40
10	1,227	9,20	9,41	27	3,565	26,74	25,79
11	1,312	9,84	10,02	28	3,780	28,35	27,26

Туяхов А.И.

Практическая метрология и измерения

© Туяхов А.И. 2002