

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет»  
Институт нефти и газа им. М. С. Гуцериева  
Кафедра Теплоэнергетики

В. П. Иванников

**Технические измерения и автоматизация  
в тепло- и электроэнергетике**

Учебное пособие



Ижевск  
2022

УДК 621.311.22:681.5(075.8)

ББК 31.32я73+32.965я73

И199

*Рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом УдГУ*

**Рецензент:** д-р техн. наук, профессор А. В. Щенятский

**Иванников В. П.**

И199 Технические измерения и автоматизация в тепло-  
и электроэнергетике: учеб. пособие – Ижевск :  
Удмуртский университет, 2022. – 372 с.

**ISBN 978-5-4312-1028-0**

Учебное пособие содержит базовые понятия теоретической метрологии, структуру, принципы построения и вопросы создания измерительных систем и автоматизации измерений и управления процессами в теплоэнергетике.

Для студентов, обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры по направлениям подготовки *13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Тепломассообменные процессы и установки»; 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Возобновляемые источники энергии и энергоэффективность»; 08.03.01 «Строительство», профиль «Теплогазоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение зданий, сооружений, населенных пунктов».*

Может быть полезно специалистам, занимающимся созданием, эксплуатацией и метрологическим обеспечением измерительных систем в теплоэнергетике.

УДК 621.311.22:681.5(075.8)

ББК 31.32я73+32.965я73

**ISBN 978-5-4312-1028-0**

© В. П. Иванников, 2022

© ФГБОУ ВО «Удмуртский

государственный университет», 2022

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	7
Глава 1. Основы теоретической метрологии и качество измерений.....	10
§ 1.1. Теоретические основы метрологии.....	10
1.1.1. Физические свойства и физические величины.....	13
1.1.2. Шкалы измерений.....	17
1.1.3. Измерение и его основные операции.....	22
1.1.4. Принципы, методы и средства измерений.....	24
1.1.5. Условия измерений.....	30
§ 1.2. Классификация измерений.....	31
§ 1.3. Этапы, результаты и качество измерений.....	36
1.3.1. Этапы измерений.....	36
1.3.2. Результаты измерений.....	39
1.3.3. Качество измерений.....	41
§ 1.4. Случайные и систематические погрешности измерений.....	42
1.4.1. Сложение случайных и систематических погрешностей.....	52
1.4.2. Обработка результатов при косвенных измерениях.....	53
1.4.3. Запись результатов измерений. Точность расчетов.....	56
1.4.4. Изображение экспериментальных результатов на графиках.....	58
1.4.5. Проведение кривых через экспериментальные точки.....	61
1.4.6. Определение искомых параметров по результатам измерений.....	63
1.4.7. Оценка погрешностей при проведении теплотехнических измерений.....	67
Глава 2. Измерение теплоэнергетических величин.....	69
§ 2.1. Измерение температуры.....	69
2.1.1. Температурные шкалы.....	69
2.1.2. Классификация средств измерения температуры.....	73
2.1.3. Термометры расширения.....	75
2.1.4. Манометрические термометры.....	82
2.1.5. Термоэлектрические термометры.....	92
2.1.6. Термопреобразователи сопротивления [12,13,14].....	101
2.1.7. Бесконтактные методы измерения температуры.....	113
§ 2.2. Измерение давления.....	115

2.2.1. Основные понятия .....	115
2.2.2. Классификация средств измерения давления .....	120
2.2.3. Жидкостные манометры.....	126
2.2.4. Деформационные датчики давления.....	129
2.2.5. Электрические датчики давления.....	135
2.2.6. Грузопоршневой манометр [33] .....	145
§ 2.3. Измерение количества и расхода [34-42].....	147
2.3.1. Основные понятия, единицы измерения .....	147
2.3.2. Измерение расхода жидкости и газа .....	148
2.3.3. Расходомеры переменного перепада давления .....	157
2.3.4. Стандартные сужающие устройства .....	163
2.3.5. Комплектация расходомера .....	168
2.3.6. Расходомеры постоянного перепада давления .....	169
2.3.7. Электромагнитные расходомеры .....	174
2.3.8. Ультразвуковые расходомеры [51-54].....	178
2.3.9. Расходомеры Кориолиса [55-58] .....	180
2.3.10. Вихревые и вихреакустические расходомеры [59; 60; 61].....	184
2.3.11. Калориметрические расходомеры [35; 62].....	189
§ 2.4. Измерение уровня .....	193
2.4.1. Основные понятия .....	193
2.4.2. Классификация приборов для измерения уровня .....	193
2.4.3. Визуальные уровнемеры .....	195
2.4.4. Поплавковые уровнемеры.....	196
2.4.5. Буйковые уровнемеры.....	197
2.4.6. Гидростатические уровнемеры.....	199
2.4.7. Электрические уровнемеры .....	205
2.4.8. Радиоизотопные уровнемеры .....	210
2.4.9. Ультразвуковые уровнемеры.....	212
2.4.10. Радарные уровнемеры [70].....	214
2.4.11. Волноводные уровнемеры .....	220
2.4.12. Сигнализаторы уровня [71].....	224
Глава 3. Автоматизация теплоэнергетических процессов и систем .....	232
§ 3.1. Структура средств автоматизации.....	235
§ 3.2. Общие положения теории автоматического управления [2] .....	236
3.2.1. Обобщенная схема системы управления.....	236
3.2.2. Анализ и синтез системы управления.....	243

3.2.3. Основные этапы управления сложным объектом.....	245
§ 3.3. Основы теории автоматического управления (регулирования) объектами и процессами в теплоэнергетике [3-8].....	255
3.3.1. Первичные приборы для измерения параметров .....	258
3.3.2. Структура объектов регулирования и автоматизации в теплоэнергетике [20-23] .....	267
3.3.3. Основные свойства теплоэнергетических объектов регулирования .....	271
§ 3.4. Основные законы регулирования [24-27] .....	278
3.4.1. Интегральный закон .....	278
3.4.2. Пропорциональный закон .....	279
3.4.3. Пропорционально-интегральный закон.....	279
3.4.4. Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон .....	279
§ 3.5. Структурная схема реализации аналоговой системы автоматического регулирования.....	282
§ 3.6. Особенности реализации цифровых схем с программным обеспечением автоматического регулирования .....	286
3.6.1. Управление работой котла с помощью программно- технического комплекса (АСУ ТП) .....	286
Глава 4. Особенности совершенствования и развития современных средств и систем управления сложными объектами и процессами .....	291
§ 4.1. Возможности использования персонального компьютера .....	293
4.1.1. Вычислительные ресурсы персонального компьютера [5] .....	295
4.1.2. Информационные возможности персонального компьютера [6] .....	300
4.1.3. Профессионал-непрограммист вместо программиста- профессионала.....	311
§ 4.2. Совершенствование средств и методов управления сложными объектами или процессами.....	313
4.2.1. Информационно-измерительные системы .....	314
§ 4.3. Современные измерительно-вычислительные комплексы средств автоматизации производственных предприятий	335
§ 4.4. Основные правила составления функциональных схем автоматизации в теплоэнергетике .....	342

4.4.1. Основные понятия .....	342
4.4.2. Порядок составления функциональных схем в теплоэнергетике .....	344
4.4.3. Условное обозначение приборов и средств автоматизации в теплоэнергетике .....	345
Список использованной литературы .....	348

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Теплотехнические измерения используются для повседневного контроля и наблюдения за работой и состоянием установленного оборудования, служат для нахождения значений многих физических величин, связанных с процессами выработки и потребления тепловой энергии: температуры, относительной влажности, тепловой энергии, давления, расхода, количества, уровня и состава веществ.

Разнообразие измерительных приборов – как универсальных, так и специализированных, обеспечивающих получение результата с известной погрешностью в различных условиях их применения, вызывает трудности при построении измерительных схем даже у опытных специалистов. Для тех же, кто впервые знакомится с этой проблемой, важно понять основные принципы функционирования измерительных приборов и особенности их применения, связанные с процессами выработки и потребления тепловой энергии: температуры, относительной влажности, тепловой энергии, давления, расхода, количества, уровня и состава веществ. Надежность и экономичная эксплуатация современных систем обеспечения параметров микроклимата, наружных тепловых сетей, котельных и технологического оборудования предприятий немислима без применения значительного количества разнообразного по устройству, назначению и принципу действия измерительного оборудования.

Обеспечение измерений теплотехнических величин в теплоэнергетике является многоплановой задачей: разработчику аппаратуры или исследователю необходимо, во-первых, определить совокупность физических явлений, которые можно использовать для получения оценок этих величин. Во-вторых, нужно проанализировать преимущества и проблемы практической реализации того или иного метода измерений и, наконец, выбрать конкретный способ измерений и соответствующие средства измерений, которые позволят наилучшим образом решить задачу. Широкое применение

в настоящее время в теплотехнических измерениях получили автоматические электронные измерительные приборы, отличающиеся высокой точностью, чувствительностью и быстродействием (автоматическое регулирование и управление, технологическая защита, сигнализация).

Сведения, приведенные в учебном пособии, тесно связаны с содержанием специальных технических дисциплин, изучающих вопросы отопления, вентиляции, теплогасоснабжения, теплотехники, технической термодинамики, строительной теплофизики, кондиционирования воздуха и холодоснабжения, теоретических основ создания микроклимата в помещениях гражданских и промышленных зданий, и других базовых курсов. Развернутая информация об измерительных приборах для проведения теплотехнических измерений, в том числе их подробные технические характеристики, содержится в технических паспортах и инструкциях по эксплуатации, разработанных заводами-изготовителями.

Учебное пособие можно структурно разделить на две части. В первой рассматриваются общие основы метрологии, положенные в основу методологии проведения современных измерений (глава 1). Во второй части рассматриваются методы и принципы работы, которые положены в основу методов и средств современных теплотехнических измерений (главы 2-7).

Учебное пособие предназначено для формирования общих и специальных знаний о методах измерения теплотехнических параметров, получения общих сведений о современных технических средствах измерений и овладения методами оценки погрешностей измерений и точности измерительных устройств у студентов, обучающихся по программам бакалавриата и магистратуры по направлениям подготовки 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профиль «Тепломассообменные процессы и установки»; 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Возобновляемые источники энергии и энергоэффективность в зданиях»; 08.03.01 «Строительство», профиль «Теплогасоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение зданий, сооружений, населенных

пунктов», и может быть полезно специалистам, занимающимся созданием, эксплуатацией и метрологическим обеспечением измерительных систем, включая системы учета тепловой и электрической энергии, расхода тепло- и энергоресурсов.

# ГЛАВА 1. ОСНОВЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ МЕТРОЛОГИИ И КАЧЕСТВО ИЗМЕРЕНИЙ

Общепринятое определение метрологии дано в ГОСТ 16263 – 70 «ГСИ. Метрология. Термины и определения»: метрология – наука об измерениях, методах, средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Греческое слово «метрология» образовано от слов «метро» – мера и «логос» – учение.

Метрология делится на три самостоятельных и взаимно дополняющих раздела: *теоретическая метрология*, *прикладная метрология* и *законодательная метрология*.

В разделе «*теоретическая метрология*» излагаются общие вопросы теории измерений.

Раздел «*прикладная метрология*» посвящен изучению вопросов практического применения в различных сферах деятельности результатов теоретических исследований.

В заключительном разделе «*законодательная метрология*» рассматриваются взаимосвязанные и взаимообусловленные комплексы общих правил, требований и норм, а также другие вопросы, нуждающиеся в регламентации и контроле со стороны государства, направленные на обеспечение единства измерений и единообразия средств измерений (СИ).

## § 1.1. Теоретические основы метрологии

Предметом метрологии является извлечение количественной информации о свойствах объектов и процессов с заданной точностью и достоверностью.

Основное понятие метрологии в тепло- и электроэнергетике – *измерение*. Без измерений не может обойтись ни одна наука, поэтому метрология как наука об измерениях находится в тесной связи со всеми другими науками.

Любое «*измерение*», в сущности, представляет собой метод кодирования сведений и регистрации полученной в результате экс-

перимента информации, поэтому среди методов познания место «измерения» определяется как основное, поскольку решает задачу формирования данных (фиксации результатов познания), обеспечивая достоверность исследований.

Согласно ГОСТ 16263-70, измерение – это нахождение значения физической величины (ФВ) опытным путем с помощью специальных технических средств. Возможности измерений обуславливаются предварительным изучением заданного свойства объекта, построением абстрактных моделей как самого свойства, так и его носителя – объекта.

Технический и технологический аспект измерения состоит в получении количественной информации об объекте управления или контроля, без которой невозможно точное воспроизведение всех заданных условий технического процесса, обеспечение высокого качества изделий и эффективного управления объектом.

До 1918 г. метрическая система внедрялась в России факультативно, наряду со старой русской и английской (дюймовой) системами. Значительные изменения в метрологической деятельности стали происходить после подписания Советом народных комиссаров РСФСР декрета «О введении международной метрической системы мер и весов». Внедрение метрической системы в России происходило с 1918 по 1927 г. После Великой Отечественной войны и до настоящего времени метрологическая работа в нашей стране проводится под руководством Государственного комитета по стандартам (Госстандарт).

Нормативно-правовой основой метрологического обеспечения точности измерений является Государственная служба обеспечения единства измерений (ГСИ).

Основные нормативные документы ГСИ – государственные стандарты. Принята Международная система единиц (СИ), на основе которой для обязательного применения разработан ГОСТ 8.417-2002.

В СССР на базе Главной палаты мер и весов создано высшее научное учреждение страны – Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева (ВНИИМ). В лабораториях института разрабатываются и хранятся государственные эталоны единиц измерений, определяются физические константы и свойства веществ и материалов.

Тематика работ института охватывает линейные, угловые, оптические и фотометрические, акустические, электрические и магнитные измерения, измерения массы, плотности, силы, давления, вязкости, твердости, скорости, ускорения и ряда других величин.

В 1955 г. под Москвой был создан второй метрологический центр страны - ныне Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ). Он разрабатывает эталоны и средства точных измерений в ряде важнейших областей науки и техники: радиоэлектронике, службе времени и частоты, акустике, атомной физике, физике низких температур и высоких давлений.

Третьим метрологическим центром России является Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС) - головная организация в области прикладной и законодательной метрологии. На него возложена координация и научно-методическое руководство метрологической службой страны. Кроме перечисленных существует ряд региональных метрологических институтов и центров [1].

К международным метрологическим организациям относится и Международная организация законодательной метрологии (МОЗМ), образованная в 1956 г. При МОЗМ в Париже работает Международное бюро законодательной метрологии. Его деятельностью руководит Международный комитет законодательной метрологии. Некоторые вопросы метрологии решает и Международная организация по стандартизации (ИСО) [2].

«XI Международная конференция по мерам и весам» в 1960 г. приняла Международную систему единиц физических величин (ФВ) – систему СИ. Сегодня система СИ узаконена более чем в 124 странах мира.

### **1.1.1. Физические свойства и физические величины**

Все объекты окружающего мира характеризуются своими свойствами. *Свойство* – философская категория, выражающая такую сторону объекта (явления, процесса), которая обуславливает его различие или общность с другими объектами (явлениями, процессами) и обнаруживается в его отношениях к ним. *Свойство* – категория качественная. Для количественного описания различных свойств, процессов и физических тел вводится понятие *величины*.

*Величина* – это свойство чего-либо, которое может быть выделено среди других *свойств* и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно. *Величина* не существует сама по себе, она имеет место лишь постольку, поскольку существует объект со *свойствами*, выраженными данной *величиной*.

Анализ *величин* позволяет разделить их на два вида: *реальные и идеальные*.

*Идеальные величины* главным образом относятся к математике и являются обобщением (моделью) конкретных реальных понятий. Они вычисляются тем или иным способом.

*Реальные величины* в свою очередь делятся на *физические и нефизические*.

*Физическая величина* в общем случае может быть определена как величина, свойственная материальным объектам (процессам, явлениям), изучаемым в естественных (физика, химия) и технических науках.

К *нефизическим величинам* следует отнести присущие общественным (нефизическим) наукам - философии, социологии, экономике и т. п.

Стандарт ГОСТ 16263-70 трактует *физическую величину* как одно из свойств физического объекта, в качественном отношении общее для многих физических объектов, а в количественном - индивидуальное для каждого из них. Индивидуальность в количественном отношении понимают в том смысле, что свойство может быть для одного объекта в определенное число раз больше или меньше, чем для другого. Таким образом, физические величины – это измеренные свойства физических объектов или процессов, с помощью которых они могут быть изучены.

*Физические величины* целесообразно разделить на *измеряемые* и *оцениваемые*. *Измеряемые ФВ* могут быть выражены количественно в виде определенного числа установленных единиц измерения. Возможность введения и использования последних является важным отличительным признаком *измеряемых ФВ*. *Физические величины*, для которых по тем или иным причинам не может быть введена единица измерения, могут быть только *оценены*. Под *оцениванием* в таком случае понимается операция приписывания данной величине определенного числа, проводимая по установленным правилам. Оценивание величины осуществляется при помощи шкал (см. § 1.1.3).

*Нефизические величины*, для которых единица измерения в принципе не может быть введена, могут быть только *оценены*. Следует отметить, что *оценивание нефизических величин* не входит в задачи теоретической метрологии [3].

Для более детального изучения *ФВ* необходимо классифицировать, выявить общие метрологические особенности их отдельных групп. Возможные классификации *ФВ* показаны на *рис. 1.1*.

По *видам явлений* они делятся на следующие группы:

- *вещественные* величины, т. е. описывающие физические и физико-химические свойства веществ, материалов и изделий из них. К этой группе относятся: *масса, плотность, электрическое сопротивление, емкость, индуктивность и др.* Иногда указанные *вещественные физические величины* называют

*пассивными*. Для их измерения необходимо использовать вспомогательный источник энергии, с помощью которого формируется сигнал измерительной информации. Как правило, *пассивные ФВ* преобразуются в *активные*, которые и измеряются;

- *энергетические*, т. е. величины, описывающие энергетические характеристики процессов преобразования, передачи и использования энергии. К ним относятся: *ток, напряжение, мощность, энергия*. Эти величины называют *активными*. Они могут быть преобразованы в сигналы измерительной информации без использования вспомогательных источников энергии;

- *физические величины, характеризующие* протекание процессов во времени. К этой группе относятся различного вида спектральные характеристики, корреляционные функции и др.

*По принадлежности к различным группам физических процессов ФВ* делятся на: *пространственно-временные, механические, тепловые, электрические и магнитные, акустические, световые, физико-химические, ионизирующих излучений, атомной и ядерной физики*.

*По степени условной независимости от других величин* данной группы ФВ делятся на *основные* (условно независимые), *производные* (условно зависимые) и *дополнительные*. В настоящее время в системе СИ используется семь физических величин, выбранных в качестве основных: *длина, время, масса, температура, сила электрического тока, сила света и количества вещества*.

К *дополнительным физическим величинам* относятся *плоский и телесный углы*.

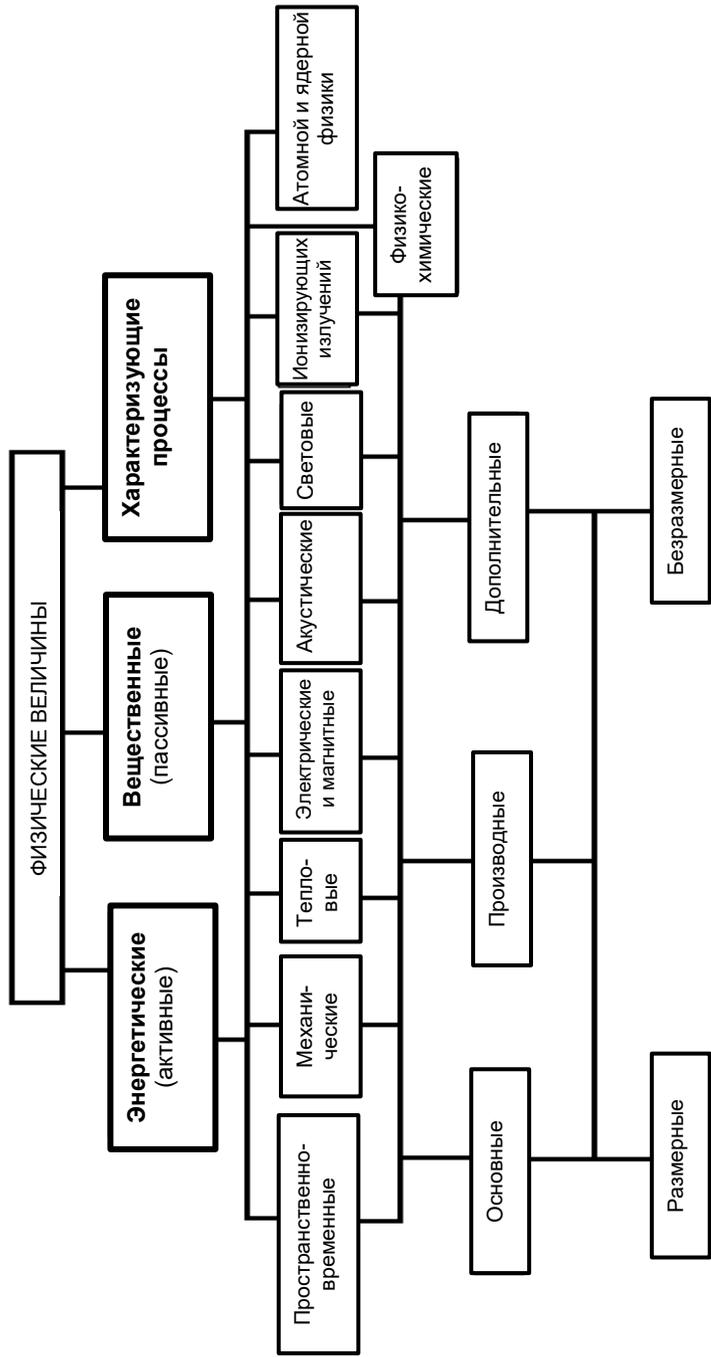


Рис. 1.1. Классификация физических величин

### 1.1.2. Шкалы измерений

В практической деятельности необходимо проводить измерения различных величин, характеризующих свойства тел, веществ, явлений и процессов. Как было показано в предыдущих разделах, некоторые свойства проявляются только качественно, другие – количественно. Разнообразные проявления (количественные или качественные) любого свойства образуют множества, отображения элементов которых на упорядоченное множество чисел или в более общем случае условных знаков образуют *шкалы измерения* этих свойств. *Шкала измерений* количественного свойства является шкалой *ФВ*.

*Шкала физической величины* – это упорядоченная последовательность значений *ФВ*, принятая по соглашению на основании результатов точных измерений. Термины и определения теории шкал измерений изложены в документе МИ 2365 – 96.

В соответствии с логической структурой проявления свойств различают пять основных типов шкал измерений.

*1. Шкала наименований (шкала классификации)*. Такие шкалы используются для классификации эмпирических объектов, свойства которых проявляются только в отношении эквивалентности. Эти свойства нельзя считать физическими величинами, поэтому шкалы такого вида, строго говоря, не являются шкалами *ФВ*. Это самый простой тип классификации объектов, основанный на приписывании качественным свойствам объектов чисел, играющих роль имен.

В *шкалах наименований*, в которых отнесение отражаемого свойства к тому или иному классу эквивалентности осуществляется с использованием органов чувств человека, наиболее адекватен результат, выбранный большинством экспертов. При этом большое значение имеет правильный выбор классов эквивалентной шкалы - они должны надежно различаться наблюдателями, экспертами, оценивающими данное свойство. Нумерация объектов по шкале наименований осуществляется по принципу: «не приписывай одну

*и ту же цифру разным объектам». Числа, приписанные объектам, могут быть использованы для определения вероятности или частоты появления данного объекта, но их нельзя использовать для суммирования и других математических операций.*

Поскольку данные шкалы характеризуются только отношениями эквивалентности, то в них отсутствуют понятия нуля, «больше» или «меньше» и единицы измерения. Примером шкал наименований являются широко распространенные атласы цветов, предназначенные для идентификации цвета.

2. *Шкала порядка (шкала рангов).* Если свойство данного эмпирического объекта проявляет себя в отношении эквивалентности и порядка по возрастанию или убыванию количественного проявления свойства, то для него может быть построена шкала порядка. Она является монотонно возрастающей или убывающей и позволяет установить отношение больше/меньше между величинами, характеризующими указанное свойство. В шкалах порядка существует или не существует нуль, но принципиально нельзя ввести единицы измерения, так как для них *не установлено отношение пропорциональности* и, соответственно, нет возможности судить, во сколько раз больше или меньше конкретные проявления свойства.

В случаях, когда уровень познания явления не позволяет точно установить отношения, существующие между величинами данной характеристики, либо применение шкалы удобно и достаточно для практики, используют условные (эмпирические) шкалы порядка. *Условная шкала* - это шкала ФВ, исходные значения которой выражены в условных единицах. Например, *шкала вязкости Энглера*, *12-балльная шкала Бофорта* для силы морского ветра.

Широкое распространение получили шкалы порядка с нанесенными на них реперными точками. К таким шкалам, например, относится *шкала Мооса* для определения твердости минералов, которая содержит 10 опорных (реперных) минералов с различными условными числами твердости: *талк* – 1; *гипс* – 2; *кальций* – 3; *флюорит* – 4; *апатит* – 5; *ортоклаз* – 6; *кварц* – 7; *топаз* – 8;

корунд – 9; алмаз – 10. Отнесение минерала к той или иной градации твердости осуществляется на основании эксперимента, который состоит в том, что испытуемый материал царапается *опорным*. Если после царапания испытуемого минерала *кварцем* (7) на нем остается след, а после *ортоклаза* (6) - не остается, то твердость испытуемого материала составляет более 6, но менее 7. Более точного ответа в этом случае дать невозможно.

В условных шкалах одинаковым интервалам между размерами данной величины не соответствуют одинаковые размерности чисел, отображающих размеры. С помощью этих чисел можно найти вероятности, моды, медианы, квантили, однако их нельзя использовать для суммирования, умножения и других математических операций.

Определение значения величин при помощи шкал порядка нельзя считать измерением, так как на этих шкалах не могут быть введены единицы измерения. Операцию по приписыванию числа требуемой величине следует считать оценением. Оценивание по шкалам порядка является неоднозначным и весьма условным, о чем свидетельствует рассмотренный пример.

3. *Шкала интервалов (шкала разностей)*. Эти шкалы являются дальнейшим развитием шкал порядка и применяются для объектов, свойства которых удовлетворяют отношениям эквивалентности, порядка и аддитивности. *Шкала интервалов* состоит из одинаковых интервалов, имеет единицу измерения и произвольно выбранное начало - нулевую точку. К таким шкалам относится летоисчисление по различным календарям, в которых за начало отсчета принято либо сотворение мира, либо рождество Христово и т. д.

Температурные шкалы *Цельсия*, *Фаренгейта* и *Реомюра* также являются шкалами интервалов.

На шкале интервалов определены действия сложения и вычитания интервалов. Действительно, по шкале времени интервалы можно суммировать или вычитать и сравнивать,

во сколько раз один интервал больше другого, но складывать даты каких-либо событий просто бессмысленно.

**4. Шкала отношений.** Эти шкалы описывают свойства эмпирических объектов, которые удовлетворяют отношениям эквивалентности, порядка и аддитивности (шкалы второго рода – аддитивные), а в ряде случаев и пропорциональности (шкалы первого рода – пропорциональные). Их примерами являются шкала массы (второго рода), термодинамической температуры (первого рода).

В *шкалах отношений* существует однозначный естественный критерий нулевого количественного проявления свойства и единица измерений, установленная по соглашению. С формальной точки зрения *шкала отношений* является шкалой интервалов с естественным началом отсчета. К значениям, полученным по этой шкале, применимы все арифметические действия, что имеет важное значение при измерении *ФВ*.

*Шкалы отношений* – самые совершенные. Они описываются уравнением  $Q = q[Q]$ , где  $Q$  – *ФВ*, для которой строится шкала,  $[Q]$  – ее единица измерения,  $q$  – числовое значение *ФВ*. Переход от одной шкалы отношений к другой происходит в соответствии с уравнением  $q_2 = q_1[Q_1]/[Q_2]$ .

**5. Абсолютные шкалы.** Некоторые авторы используют понятие *абсолютных шкал*, под которыми понимают шкалы, обладающие всеми признаками шкал отношений, но дополнительно имеющие естественное однозначное определение единицы измерения и не зависящие от принятой системы единиц измерения. Такие шкалы соответствуют относительным величинам: коэффициенту усиления, ослабления и др. Для образования многих производных единиц в системе СИ используются безразмерные и счетные единицы абсолютных шкал.

Отметим, что шкалы наименований и порядка называют не метрическими (*концептуальными*), а шкалы интервалов и отно-

шений - метрическими (*материальными*). Абсолютные и метрические шкалы относятся к разряду *линейных*.

Практическая реализация шкал измерений осуществляется путем стандартизации как самих шкал и единиц измерений, так и, в необходимых случаях, способов и условий их однозначного воспроизведения.

Физические объекты обладают неограниченным числом свойств, которые проявляются с бесконечным разнообразием. Это затрудняет их отражение совокупностями чисел с ограниченной разрядностью, возникающее при их измерении. Среди множества специфических проявлений свойств есть и несколько общих.

По наличию размерности ФВ делятся на размерные, т. е. имеющие размерность, и безразмерные [4]. Для всего разнообразия свойств физических объектов установлено наличие трех наиболее общих проявлений в отношениях эквивалентности, порядка и адитивности. Эти отношения в математической логике аналитически описываются простейшими постулатами.

Отношение эквивалентности выявляется между величинами при их сравнении в смысле идентичности (схожести, одинаковости, схожести по каким-то признакам).

Отношение порядка, то есть выявляется соотношение (больше, меньше или равно) между величинами. Примерами интенсивных величин являются твердость материала, запах и др.

Отношение адитивности, то есть выявляется способность величин при их сравнении к суммированию.

*Интенсивные величины* могут быть обнаружены и классифицированы по интенсивности, подвергнуты контролю, количественно оценены монотонно возрастающими или убывающими числами. *Интенсивные величины* отображаются путем количественного, главным образом, экспертного оценивания, при котором свойства с большим размером отображаются большим числом, чем свойства с меньшим размером.

На основании этого определения вводится понятие *размерности физической величины*, обязательно указываемое в квадратных

скобках сразу после числа, указывающего количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию  $\Phi B$ .

*Интенсивные величины* оцениваются при помощи шкал порядка и интервалов, рассмотренных далее (см. § 1.1.3).

Объекты, характеризующиеся интенсивными величинами, могут быть подвергнуты контролю.

*Контроль* - это процедура установления соответствия между реальным состоянием объекта и *нормой*. В частности, для реализации процедуры простейшего однопараметрового контроля свойств  $X$  контролируемого объекта необходимы *образцовые меры*, которые характеризуют параметры, равные соответственно нижней  $X_H$  и верхней  $X_B$  границам *нормы*, и устройство сравнения.

А результат контроля  $Q$  определяется следующим уравнением:

$$Q = \begin{cases} \text{ниже нормы } (X < X_H); \\ \text{норма } (X > X_H \text{ и } X < X_B); \\ \text{выше нормы } (X > X_B). \end{cases} \quad (1.1)$$

### 1.1.3. Измерение и его основные операции

Все *измеряемые  $\Phi B$*  можно разделить на две группы:

- *непосредственно измеряемые*, которые могут быть воспроизведены с заданными размерами и сравнимы с подобными, например: *длина, масса, время*;

- *преобразуемые* с заданной точностью в непосредственно измеряемые, например: *температура, плотность*. Преобразование осуществляется с помощью операции измерительного преобразования.

Суть простейшего *непосредственного* (прямого) *измерения* состоит в сравнении действительного размера  $\Phi B$   $Q$  с размерами выходной величины регулируемой многозначной меры  $q[Q]$  (*средства измерений*).

Условием реализации процедуры прямого измерения является выполнение следующих элементарных операций:

- измерительного преобразования измеряемой  $\Phi B X$  в другую  $\Phi B Q$ , однородную или неоднородную с ней;
- воспроизведения  $\Phi B Q_M$  заданного размера  $N[Q]$ , однородной с преобразованной величиной  $Q$ ;
- сравнения однородных  $\Phi B$ : преобразованной  $Q$  и воспроизводимой мерой  $Q_M = N[Q]$ .

Структурная схема измерения показана на рис. 1.2.

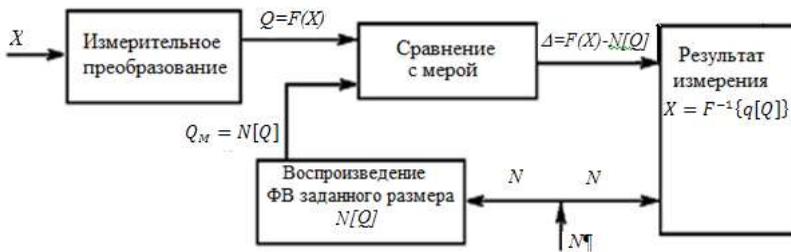


Рис. 1.2. Структурная схема измерения

Для получения результата измерения необходимо обеспечить выполнение при  $N=q$  условия:

$$\Delta = Q - q[Q] = F(X) - N[Q] = \min(F[X] - N[Q]), \quad (1.2)$$

т. е. погрешность сравнения величин  $Q$  и  $Q_M$  должна быть минимизирована. В этом случае результат измерений находится как  $X = F^{-1}\{q[Q]\}$ , где  $F^{-1}$  - операция, обратная операции  $F$ , осуществляемой при измерительном преобразовании.

*Измерительное преобразование* – операция, при которой устанавливается взаимно однозначное соответствие между размерами в общем случае неоднородных преобразуемой и преобразованной  $\Phi B$ . Измерительное преобразование описывается уравнением вида  $Q = F(X)$ , где  $F$  - некоторая функция, или функционал (см. рис. 1.2). Часто стремятся сделать преобразование линейным:  $Q = KX$ , где  $K$  - постоянная величина. Основное назначение измерительного преобразования - получение и, если это необходимо, пре-

образование информации об измеряемой величине. Его выполнение осуществляется на основе выбранных физических закономерностей.

В измерительное преобразование в общем случае могут входить следующие операции:

- изменение физического рода преобразуемой величины;
- масштабное линейное преобразование;
- масштабное-временное преобразование;
- нелинейное или функциональное преобразование;
- модуляция сигнала;
- дискретизация непрерывного сигнала;
- квантование.

Операция измерительного преобразования осуществляется посредством *измерительного преобразователя* - технического устройства, построенного на определенном физическом принципе и выполняющего одно частное измерительное преобразование.

*Воспроизведение физической величины* заданного размера  $N[Q]$  – это операция, которая заключается в создании требуемой  $\Phi B$ , с заданным значением, известным с оговоренной точностью. Операцию воспроизведения величины определенного размера можно формально представить как преобразование кода  $N$  в заданную физическую величину  $Q_M$ , основанное на единице данной  $\Phi B [Q]$ :  $Q_M = N[Q]$  (см. рис. 1.2).

Степень совершенства операции воспроизведения  $\Phi B$  заданного размера определяется постоянством размера каждой ступени квантования меры  $[Q]$  и степенью многозначности, т. е. числом  $N$  воспроизводимых известных значений.

#### **1.1.4. Принципы, методы и средства измерений**

*Принципы измерений* – совокупность физических принципов, на которых основаны измерения. Например, применение эффекта Джозефсона для измерения электрического напряжения, или эффекта Доплера для измерения скорости.

*Метод измерения* - это прием или совокупность приемов сравнения измеряемой  $FV$  с ее единицей в соответствии с реализованным принципом измерения.

*Метод измерения* должен по возможности иметь минимальную погрешность и способствовать исключению систематических погрешностей или переводу их в разряд случайных.

*Методы измерения* можно классифицировать по различным признакам. Классификация по основным измерительным операциям, проведенная в работе [5], тесно связана с *элементарными СИ*, реализующими эти операции. Данная классификация ориентирована на структурное описание средств измерений и поэтому важна для измерительной техники, а также метрологии информационно-измерительных систем.

Для метрологического анализа более важными являются традиционные классификации, основанные на следующих признаках.

*Первый принцип*, положенный в основу измерения - *физический*. В этом случае методы измерений делятся на *электрические, магнитные, акустические, оптические, механические* и т. д.

В качестве *второго признака* классификации используется *режим взаимодействия средства и объекта измерений*. В этом случае все методы измерений подразделяются на *статические* и *динамические*.

Третьим признаком может служить применяемый в *СИ вид измерительных сигналов*. В соответствии с ним методы делятся на *аналоговые* и *цифровые*.

Наиболее разработанной является классификация по совокупности приемов использования принципов и средств измерений. Этот принцип классификации называют *классификацией методов измерений*. В рамках этой классификации различают *метод непосредственной оценки* и *методы сравнения*. Однако эти устоявшиеся в литературе названия не совсем удачны, поскольку наводят на мысль о возможности измерения без сравнения. Представляется более правильным говорить об опосредованном и непосредственном сравнении с мерой, как это справедливо отмечено в [6].

При этом непосредственным и опосредованным сравнение может быть как во времени, так и в отношении физической природы измеряемых величин (рис. 1.3).

Сущность метода непосредственной оценки состоит в том, что о значении измеряемой величины судят по показанию одного (прямые измерения) или нескольких (косвенные измерения) средств измерений, которые заранее проградуированы в единицах измеряемой величины или единицах других величин, от которых она зависит. Это наиболее распространенный метод измерения. Его реализуют большинство средств измерений.

Простейшими примерами метода непосредственной оценки могут служить измерения напряжения электромеханическим вольтметром магнитоэлектрической системы или частоты импульсной последовательности методом дискретного счета, реализованным в электронно-счетном частотомере.

Другую группу образуют методы сравнения: *дифференциальный, нулевой, совпадений, замещения*. К ним относятся все те методы, при которых измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой. Отличительной особенностью этих методов сравнения является непосредственное участие мер в процессе измерения.

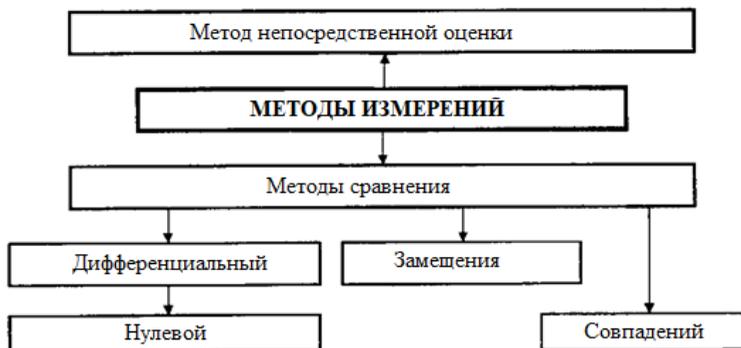


Рис. 1.3. Классификация методов измерения

При *дифференциальном методе* измеряемая величина  $X$  сравнивается непосредственно или косвенно с величиной  $X_m$  воспроизводимой мерой. О значении величины  $X$  судят по измеряемой прибором разности  $\Delta X = X_m - X$  и по известной величине  $X_m$ , воспроизводимой мерой. Следовательно,  $X = X_m + \Delta X$ . При дифференциальном методе производится неполное уравнивание измеряемой величины. Он сочетает в себе часть признаков метода непосредственной оценки и может дать весьма точный результат измерения, если только измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, мало отличаются друг от друга. Например, если разность этих двух величин составляет 1 % и измеряется с погрешностью до 1 %, то тем самым погрешность измерения искомой величины уменьшается до 0,01 % (если не учитывать погрешность меры).

Примером дифференциального метода может служить измерение вольтметром разности двух напряжений, из которых одно известно с большой точностью, а другое представляет собой искомую величину.

*Нулевой метод* является разновидностью дифференциального метода. Его отличие состоит в том, что результирующий эффект сравнения двух величин доводится до нуля. Это контролируется специальным измерительным прибором высокой точности – *нуль-индикатором*. В данном случае значение измеряемой величины равно значению, которое воспроизводит мера. Высокая чувствительность *нуль-индикаторов*, а также выполнение меры с высокой точностью позволяют получить малую погрешность измерения. Пример нулевого метода - взвешивание на весах, когда на одном плече находится взвешиваемый груз, а на другом - набор эталонных грузов. Другой пример - измерение сопротивления с помощью уравновешенного моста.

*Метод замещения* заключается в поочередном измерении прибором искомой величины и выходного сигнала меры, однородного с измеряемой величиной. По результатам этих измерений вычисляется искомая величина. Поскольку оба измерения производятся одним и тем же прибором в одинаковых внешних условиях,

а искомая величина определяется по отношению показаний прибора, погрешность результата измерения уменьшается в значительной мере. Так как погрешность прибора неодинакова в различных точках шкалы, наибольшая точность измерения получается при одинаковых показаниях прибора.

Пример *метода замещения* – это измерение большого электрического активного сопротивления путем поочередного измерения силы тока, протекающего через контролируемый и образцовый резисторы. Питание цепи при измерениях должно осуществляться от одного и того же источника постоянного тока. Выходное сопротивление источника тока и измерительного прибора – амперметра – должно быть очень мало по сравнению с измеряемыми сопротивлениями.

При *методе совпадений* разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, определяют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов. Этот метод широко используется в практике неэлектрических измерений. Примером может служить измерение длины при помощи штангенциркуля с нониусом. Примером использования данного метода в электрических измерениях является измерение частоты вращения тела посредством стробоскопа. Метод измерений реализуется в средстве измерений - техническом средстве, используемом при измерениях и имеющем нормированные метрологические свойства (ГОСТ 16263-70).

Такое определение представляется не совсем удачным. По сути дела, под *СИ* следует понимать техническое средство, предназначенное для измерений и позволяющее решать измерительную задачу путем сравнения измеряемой величины с единицей или шкалой *ФВ* [6].

Средство измерений является обобщенным понятием, объединяющим самые разнообразные конструктивно законченные устройства, которые обладают одним из двух признаков:

- вырабатывают сигнал (показание), несущий информацию о размере (значении) измеряемой величины;

- воспроизводят величину заданного (известного) размера.

Объединение технических средств по этим двум признакам сделано только из соображений целесообразности общего метрологического анализа, удобства изложения и регламентации метрологических требований и правил, единых для всех видов *СИ*.

При использовании *СИ* весьма важно знать степень соответствия выходной измерительной информации истинному значению определяемой величины. Для ее установления введено правило, по которому требуется нормировать метрологические характеристики всех средств измерений.

*Метрологические характеристики* – это характеристики свойств *СИ*, которые оказывают влияние на результат измерений и его погрешности и предназначены для оценки технического уровня и качества *СИ*, а также определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик инструментальной составляющей погрешности измерений.

Средство измерений, как правило, входит в обе ветви структуры измерения [6]. В реальности оно взаимодействует с объектом измерений, в результате чего появляется входной (для *СИ*) сигнал и отклик на него - выходной сигнал, подлежащий обработке с целью нахождения результата измерения и оценки его погрешности. В области отражений *СИ* описывается моделью, необходимой для эффективной обработки опытных данных. Эта модель представлена совокупностью его метрологических характеристик.

Средства измерений могут быть элементарными (*меры, устройства сравнения и измерительные преобразователи*) и комплексными (*региструющие и показывающие измерительные приборы, системы, измерительно-вычислительные комплексы*).

### 1.1.5. Условия измерений

Под *условиями измерений* понимают совокупность влияющих на измерения *физических величин*, описывающих состояние окружающей среды и средств измерений. Это параметры, оказывающие влияние на результаты измерений, но не измеряемые данным *СИ*.

Влияние условий измерения на *СИ* проявляется в изменении его метрологических характеристик. Изменение условий измерения может приводить к изменению состояния объекта измерения и к отклонению значения действительной величины от той, что была определена при формировании измерительной задачи. При этом та часть погрешности измерения, которая возникает из-за изменения условий, называется *дополнительной погрешностью*.

В соответствии с установленными для конкретных ситуаций диапазонами значений влияющих величин различают нормальные, рабочие и предельные условия измерений.

*Нормальные условия измерений* – это условия, при которых влияющие величины имеют нормальные или находящиеся в пределах нормальной области значений.

*Нормальная область значений влияющей величины* – это область значений, в пределах которой изменением результата измерений под воздействием влияющей величины можно пренебречь в соответствии с установленными нормами точности. *Нормальные условия измерений* задаются в нормативно-технической документации на *СИ*. При нормальных условиях определяется *основная погрешность* данного *СИ*.

*Рабочими* называются условия измерений, при которых влияющие величины находятся в пределах рабочих областей измерения. *Рабочая область значений влияющей величины* – это область, в пределах которой нормируется дополнительная погрешность и изменение показаний *СИ*.

*Предельные условия измерений* – это условия, характеризующиеся экстремальными значениями измеряемой и влияющих величин, которые *СИ* может выдержать без разрушений и ухудшения его метрологических характеристик.

## § 1.2. Классификация измерений

Поскольку классификация любых объектов представляет собой их условное группирование по тем или иным признакам, осуществляемое с определенной целью, то при различных целях классификации одни и те же объекты могут быть сгруппированы по-разному. Следует также помнить о том, что классификация не является самоцелью, а диктуется потребностями теории и практики.

*Классификация измерений* диктуется необходимостью разработки специальных методик выполнения измерений и обработки результатов. Измерения могут быть классифицированы по ряду признаков. Наибольшее распространение получила классификация по общим приемам получения результатов, согласно которым измерения подразделяются на *прямые, косвенные, совместные* и *совокупные*. Целью такого деления является удобство выделения методических погрешностей измерений, возникающих при определении результатов измерений.

*Прямыми* называются измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно по показаниям СИ. Например, масса, измеряемая при помощи весов, температура – термометром, напряжение – вольтметром и т. д.

*Косвенные измерения* – это измерения, при которых значение находят на основании известной зависимости между измеряемой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям, которые проводились в одинаковых условиях. Такие измерения особенно важны для метрологической практики. На их основе, например, устанавливают значения, приписываемые эталонам единиц производных ФВ, исходя из значений единиц основных величин, воспроизводимых первичными эталонами.

В общем случае зависимость, связывающую измеряемую величину  $Y$  и величины  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , подвергаемые прямым измерениям, можно представить в виде

$$Y = F(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (1.3)$$

Например, измерение плотности вещества  $\rho = m/V$  по результатам прямых измерений массы  $m$  и объема  $V$ ; измерение активного сопротивления  $R = U/I$  по результатам прямых измерений напряжения  $U$  и тока  $I$ .

По виду функциональной зависимости  $F$  различают косвенные измерения:

- с линейной зависимостью:

$$Y = \sum_{i=1}^n K_i X_i, \text{ где } K_i - \text{ постоянный коэффициент } i\text{-го аргумента;}$$

- с нелинейной зависимостью:

$$Y = \prod_{i=1}^n f(X_i), \text{ где } f(X_i) - \text{ некоторые функции;}$$

- измерения с зависимостями смешанного типа:

$$Y = \sum_{i=1}^n \left[ \prod_{i=1}^n f(X_i) \right].$$

Вид связи между  $Y$  и  $X$  определяет методику расчета погрешностей косвенных измерений.

В современных микропроцессорных измерительных приборах очень часто вычисления искомой измеряемой величины производятся «внутри» прибора. В этом случае результат измерения определяется способом, характерным для прямых измерений, и нет необходимости и возможности отдельного учета методической погрешности расчета. Она входит в погрешность измерительного прибора.

Измерения, проводимые такого рода средствами измерений, относятся к *прямым*.

К *косвенным* относятся только такие измерения, при которых расчет осуществляется вручную или автоматически, но после получения результатов прямых измерений. При этом может быть учтена отдельно погрешность расчета. Характерный пример такого случая – измерительные системы, для которых нормированы метрологиче-

ские характеристики их компонентов по отдельности. Суммарная погрешность измерений рассчитывается по нормированным метрологическим характеристикам всех компонентов системы.

*Совокупными* называются проводимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых их искомые значения находят решением системы уравнений, получаемых при прямых измерениях различных сочетаний этих величин.

*Совместными* называются проводимые одновременно измерения двух или нескольких не одноименных величин для установления зависимости между ними.

Как видно из приведенных определений, эти два вида измерений весьма близки друг к другу. В обоих случаях искомые значения находятся в результате решения системы уравнений, коэффициенты в которых получены путем прямых измерений. Отличие состоит в том, что при совместных измерениях одновременно определяются несколько одноименных величин, а при совокупных – разноименных.

*Косвенные, совместные и совокупные* измерения объединяются одним принципиально важным общим свойством: их результаты определяются расчетом по известным функциональным зависимостям между измеряемыми величинами и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Различие между этими видами измерений заключается только в виде функциональной зависимости, используемой при расчетах.

При *косвенных* измерениях она выражается одним уравнением в явном виде (1.3), при совместных и совокупных – системой неявных уравнений. Поэтому уже неоднократно высказывались мнения [7] о сокращении приведенной выше классификации. Все измерения делят на прямые и косвенные, которые в свою очередь подразделяются на несколько групп, различающихся между собой видом уравнений, представляющих функциональные зависимости между измеряемыми величинами и величинами, подвергаемыми прямым измерениям.

По *характеристике точности* измерения делятся на равноточные и неравноточные. *Равноточными* называются измерения какой-либо *ФВ*, выполненные одинаковыми по точности *СИ* и в одних и тех же условиях. Соответственно, *неравноточными* называются измерения *ФВ*, выполненные различными по точности *СИ* и (или) в разных условиях. Методика обработки результатов равноточных и неравноточных измерений различна.

В зависимости от *числа измерений*, проводимых во время эксперимента, различают *одно- и многократные измерения*.

*Однократными* называются измерения, выполненные один раз.

К *многократным* относятся измерения одного и того же размера *ФВ*, следующие друг за другом. Известно, что при числе отдельных измерений более четырех их результаты могут быть обработаны в соответствии с требованиями математической статистики. Это означает, что при четырех и более измерениях, входящих в ряд, измерения можно считать *многократными*. Их проводят с целью уменьшения случайной составляющей погрешности.

По *отношению к изменению измеряемой величины* измерения делятся на *статические* и *динамические*. Целью данной классификации является возможность принятия решения о том, нужно ли при конкретных измерениях учитывать скорость изменения измеряемой величины или нет. Погрешности, вызываемые влиянием скоростей изменения измеряемой величины, называются динамическими.

К *статическим* относятся измерения *ФВ*, принимаемой в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменную на протяжении времени измерения.

*Динамические* измерения – это измерения изменяющейся по размеру *ФВ*. Признаком, по которому измерение относят к *статическому* или *динамическому*, является динамическая погрешность при данной скорости или частоте изменения измеряемой величины и заданных динамических свойствах *СИ*. Предположим, что она пренебрежимо мала в рамках решаемой измерительной задачи.

В этом случае измерение *можно считать статическим*. При невыполнении указанных требований *измерение является динамическим*.

В зависимости от *метрологического назначения* измерения делятся на *технические* и *метрологические*.

*Технические измерения* проводятся рабочими *СИ*.

*Метрологические измерения* выполняются при помощи эталонов с целью воспроизведения единиц *ФВ* для передачи их размера рабочим *СИ*.

При *метрологических измерениях* в обязательном порядке учитываются погрешности.

При *технических измерениях* принимается наперед заданная погрешность, достаточная для решения данной практической задачи. Поэтому при *технических измерениях* нет необходимости определять и анализировать погрешности получаемых результатов. Технические измерения являются наиболее массовым видом.

В зависимости от *выражения результатов измерений* последние подразделяются на *абсолютные* и *относительные*.

*Абсолютное измерение* основано на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и/или использовании значений физических констант. Понятие *абсолютное измерение* применяется как противоположное понятию *относительное измерение* и рассматривается как определение величины в ее единицах.

*Относительное измерение* – это измерение отношения определяемой величины к одноименной. Например: измерение активности радионуклида в источнике по отношению к активности радионуклида в однотипном источнике, аттестованном в качестве образцовой меры активности.

*Относительные измерения*, при прочих равных условиях, могут быть выполнены более точно, чем *абсолютные*, поскольку в суммарную погрешность не входит погрешность меры величины.

## § 1.3. Этапы, результаты и качество измерений

### 1.3.1. Этапы измерений

Измерение – последовательность сложных и разнородных действий, состоящая из ряда этапов [6]:

1. Первым этапом любого измерения является *постановка измерительной задачи*. Он включает в себя:

- *сбор данных* об условиях измерения и исследуемой ФВ, т. е. накопление априорной информации об объекте измерения и ее анализ;

- *формирование модели объекта* и определение измеряемой величины, что является наиболее важным, особенно при решении сложных измерительных задач. Измеряемая величина определяется с помощью принятой модели как ее параметр или характеристика. В простых случаях, т. е. при измерениях невысокой точности, модель объекта в явном виде не выделяется, а пороговое несоответствие пренебрежимо мало;

- *постановку измерительной задачи* на основе принятой модели объекта измерения;

- *выбор конкретных величин*, посредством которых будет находиться значение измеряемой величины;

- *формулирование уравнения измерения*.

2. Вторым этапом процесса измерения является *планирование измерения*. В общем случае оно выполняется в следующей последовательности:

- *выбор методов* измерений непосредственно измеряемых величин и возможных типов СИ;

- *априорная оценка погрешности* измерения;

- *определение требований* к метрологическим характеристикам СИ и условиям измерений;

- *выбор СИ* в соответствии с указанными требованиями;

- *установление параметров измерительной процедуры* (числа наблюдений для каждой измеряемой величины, моментов времени и точек выполнения наблюдений);

- *подготовка СИ* к выполнению экспериментальных операций;

- *обеспечение требуемых условий измерений* или создание возможности их контроля.

Первые два этапа, являющиеся подготовкой к измерениям, имеют принципиальную важность, поскольку определяют конкретное содержание следующих этапов измерения. Поскольку подготовка проводится на основе априорной информации, то качество подготовки зависит от того, в какой мере она была использована. То есть подготовка является необходимым, но недостаточным условием достижения цели измерения. Более того, ошибки, допущенные при подготовке измерений, с трудом обнаруживаются и корректируются на последующих этапах. И это необходимо в обязательном порядке принимать во внимание.

**3.** Третий, главный этап измерения – *измерительный эксперимент*. В узком смысле – это отдельно взятое измерение. В общем случае - это совокупность измерений. Последовательность действий при реализации этого этапа следующая:

- обеспечение взаимодействия средства измерений и объекта;
- преобразование сигнала измерительной информации;
- воспроизведение сигнала в установленных пределах;
- сравнение результатов измерений и их регистрация.

**4.** И последний, четвертый этап измерения – *обработка экспериментальных данных*. В общем случае она осуществляется в последовательности, которая отражает логику решения любой измерительной задачи:

- предварительный анализ информации, полученной на предыдущих этапах измерения;
- вычисление и внесение возможных поправок в результаты измерения, с учетом систематической погрешности;
- формулирование и анализ математической задачи обработки данных;

- построение или уточнение возможных алгоритмов обработки данных, т. е. алгоритмов вычисления результата измерения и погрешности;

- анализ возможных алгоритмов обработки и выбор одного из них на основании известных свойств алгоритмов, априорных данных и предварительного анализа экспериментальных данных;

- проведение вычислений согласно принятому алгоритму, в результате которых получают значения измеряемой величины и погрешности измерений;

- анализ и интерпретация полученных результатов;

- запись результата измерений и погрешности в соответствии с установленной формой представления.

Некоторые пункты этапов последовательности могут отсутствовать при реализации конкретной процедуры и обработки данных. При этом задача обработки результатов измерений должна быть подчинена цели измерения и после выбора *СИ* однозначно определяется самой измерительной задачей.

Перечисленные выше этапы существенно различаются по выполняемым операциям и их трудоемкости. В конкретных случаях соотношение и значимость каждого из этапов заметно варьирует. Для многих технических измерений вся процедура измерения сводится к экспериментальному этапу, поскольку анализ и планирование, включая априорное оценивание погрешности, выбор нужных методов и средств измерений, осуществляются предварительно, а обработка данных измерений, как правило, минимизируется.

Выделение этапов измерения имеет непосредственное практическое значение, поскольку способствует своевременному и осознанному выполнению всех действий и оптимальной реализации измерений. А это, в свою очередь, позволяет избежать серьезных методических ошибок, связанных с переносом проблем одного этапа на другой.

### 1.3.2. Результаты измерений

Конечной целью любого измерения является его *тат* - значение ФВ, полученное путем ее измерения. Результат измерения представляется именованным или неименованным числом. Совместно с результатом измерений при необходимости приводят данные об условиях измерений.

При использовании термина *результат измерения* следует четко указать, к чему он относится: показанию *СИ*, исправленному или неисправленному результату, и проводилось ли усреднение результатов нескольких измерений. Следует отметить, что *исправленным результатом измерений* называется полученное с помощью *СИ* значение величины и уточненное путем введения в него необходимых поправок на действие предполагаемых систематических погрешностей.

*Качество измерений* характеризуется *точностью, достоверностью, правильностью, сходимостью и воспроизводимостью*, а также размером допускаемых погрешностей - *допуском*.

*Точность измерения* - характеристика качества измерения, отражающая близость к нулю погрешности его результата. *Точность измерения* является величиной качественной. Высокая точность измерения соответствует малым погрешностям, и наоборот. Иногда точность количественно оценивают обратной величиной модуля относительной погрешности. Например, если *относительная погрешность* составляет  $0,001$ , то *точность* равна  $1000^x$ . Однако такая количественная оценка точности широкого распространения не получила.

*Достоверность* - характеристика качества измерений, задающаяся степенью доверия к результату измерения, то есть вероятность того, что истинное значение измеряемой величины находится в указанных пределах. Такая вероятность называется *доверительной*.

*Правильность* измерений - это характеристика измерений, отражающая близость к нулю систематических погрешностей результатов измерений.

*Сходимость* результатов измерений – характеристика качества измерений, отражающая близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполняемых повторно одними и теми же методами и средствами измерений и в одних и тех же условиях. *Сходимость* измерений отражает влияние случайных погрешностей на результат измерения.

*Воспроизводимость* результатов измерений – характеристика качества измерений, отражающая близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, полученных в разных местах, разными методами и средствами измерений, разными операторами, но приведенных к одним и тем же условиям.

Количественная близость измеренного и истинного значений измеряемой величины описывается *погрешностью* результата измерений.

*Погрешность* – это отклонение  $\Delta X$  результата измерения  $X_{изм}$  от истинного значения  $X_{ис}$  измеряемой величины, определяемое по формуле

$$\Delta X = X_{изм} - X_{ис}. \quad (1.4)$$

Абсолютно точно определить *погрешность* измерения принципиально невозможно, поскольку в противном случае введением поправки можно найти истинное значение. То есть результат измерения  $X_{изм}$  и есть истинное значение.

Учение о *погрешностях* измерений и средств измерений является одной из центральных тем в теоретической метрологии, где показывается, что результат измерения и оценка его погрешности находятся *субъектом измерения* с помощью вычислительных средств (ветвь реальности), работающих по определенному алгоритму обработки измерительной информации (модельная ветвь).

Иными словами, *субъект измерения* – это человек (оператор), объединяющий обе ветви процесса измерения (реальности и отражения), активно воздействующий на процесс измерения и осуществляющий:

- постановку измерительной задачи;
- сбор и анализ априорной информации об объекте измерения;
- анализ адекватности объекта измерения выбранной модели;
- обработку результатов измерений.

### 1.3.3. Качество измерений

Качество измерений определяется их *точностью*. *Точность измерений* характеризуется их *погрешностью*.

*Абсолютной погрешностью* измерений называют разность между найденным на опыте и истинным значением физической величины. Обозначая погрешность измерения величины  $X$  символом  $\Delta X$  (1.4), *относительную погрешность* измерений определим как отношение абсолютной погрешности к значению измеряемой величины:

$$\delta_X = \frac{\Delta X}{X_{ист}}. \quad (1.5)$$

Качество измерений обычно определяется именно *относительной*, а не *абсолютной* погрешностью. Одна и та же погрешность в 1 мм при измерении длины комнаты не играет роли, при измерении длины стола может уже быть существенна, а при определении диаметра болта совершенно недопустима.

Это происходит потому, что *относительная погрешность* измерений в первом случае составляет  $\approx 2 \cdot 10^{-4}$ , во втором  $\approx 10^{-3}$ , а в третьем может составлять десятки процентов и более.

Поэтому вместо того, чтобы говорить об *абсолютной* или *относительной* погрешности измерений, часто говорят об *абсолютных* и *относительных* ошибках измерений. Здесь нет никакого различия.

Однако цель измерений всегда состоит в том, чтобы узнать не известное заранее значение физической величины и найти если не ее истинное значение, то хотя бы значение, достаточно мало от него отличающееся. Поэтому формулы (1.2) и (1.4) на практике не применяются.

При практических измерениях погрешности не вычисляются, а оцениваются. При оценках (которые редко удается провести с точностью лучше 20-30 %) учитываются условия проведения эксперимента, точность методики, качество приборов и ряд других факторов.

#### **§ 1.4. Случайные и систематические погрешности измерений**

Говоря о погрешностях измерений, следует прежде всего упомянуть о *грубых погрешностях* (промахах), возникающих вследствие недосмотра оператора или неисправности аппаратуры. Такие ошибки происходят, если, например, экспериментатор неправильно прочтет номер деления на шкале, если в электрической цепи произойдет замыкание и вследствие других подобных причин. *Грубых погрешностей* следует избегать. Если установлено, что они произошли, соответствующие измерения нужно отбрасывать.

Погрешности измерений выявляют путем сравнения результатов, полученных при нескольких опытах, поставленных в одинаковых условиях. Два-три измерения следует производить всегда. Если результаты совпали, то на этом следует остановиться. Если же они расходятся, нужно попытаться понять причину расхождения. Часто она связана с тем, что прибор неисправен, ненадежно закреплен или плохо смазан, что электрические контакты не пропаяны или недостаточно зажаты. В этом случае прежде всего нужно попытаться исправить аппаратуру. Если устранить причину не удастся, нужно произвести несколько измерений и записать все полученные результаты. Ниже будет рассказано о том, как следует поступать с полученными числами.

Поскольку в измерительном эксперименте речь идет об анализе результатов эксперимента со свойствами статистической устойчивости, что в целом характерно для любых измерительных процедур, то обратимся к анализу несвязанных с *грубыми ошибками, случайными и систематическими* погрешностями измерений, с точки зрения базовых понятий теории вероятностей.

Многokrратно повторяя одни и те же измерения, можно заметить, что довольно часто их результаты не в точности равны друг другу, а «пляшут» вокруг некоторого среднего. Как правило, такие случайные величины являются характерными примерами двух основных классов, рассматриваемых в теории вероятностей - *непрерывных* и *дискретных*, распределены *нормально* и по *биномиальному закону*.

### *Дискретные случайные величины*

Случайная величина  $\xi$  называется *дискретной*, если множество ее значений конечно и счетно.

Для полной характеристики дискретной случайной величины, принимающей значения  $\Delta X_1, \Delta X_2, \dots, \Delta X_k$ , достаточно задать вероятности  $p_k = P\{\Delta X_k\}$ . Зная значения  $\Delta X_k$  и  $p_k$   $k=1, 2, \dots$ , можно записать функцию распределения вероятностей  $F(\Delta X)$  дискретной случайной величины  $\Delta X_k$  в виде

$$F(\Delta X) = \sum_{k: \Delta X_k \leq \Delta X} p_k. \quad (1.6)$$

Очевидно, что  $F(\Delta X)$  не зависит от способа нумерации значений случайной величины  $\Delta X$ . Таким образом, функция распределения любой дискретной случайной величины «разрывна», то есть изменяется скачками в точках  $\Delta X = \Delta X_k$ , а величина скачка равна

$$F(\Delta X_{k+0}) - F(\Delta X_k) = p_k. \quad (1.7)$$

### **Непрерывные случайные величины**

Случайная величина  $\xi$  называется *непрерывной* (или абсолют-но непрерывной), если ее функция распределения представима в виде

$$F(\xi) = \int_{-\infty}^{\xi} p(y) dy. \quad (1.8)$$

Функция  $p(y)$ ,  $-\infty < y < \infty$ , называется *плотностью распределения вероятностей* (или *плотностью вероятности*) случайной величины  $\xi$  и далее предполагается неотрицательной и кусочно-непрерывной. Плотность  $p(y)$  полностью определяет функцию распределения  $F(\xi)$ , а в точках непрерывности  $p(y)$  определяется по функции распределения, так как в этих точках

$$p(\xi) = \frac{dF(\xi)}{d(\xi)}, \quad (1.9)$$

и, таким образом, в этих точках свойство не отрицательности плотности является следствием не убывания  $F(\xi)$ .

Для любых  $\xi_1 < \xi_2$ ,

$$P\{\xi_1 \leq \xi < \xi_2\} = F(\xi_2) - F(\xi_1) = \int_{\xi_1}^{\xi_2} p(y) dy. \quad (1.10)$$

Если, в частности, плотность  $p(y)$  непрерывна на  $[\xi, \xi + \Delta\xi]$ ,  $\Delta\xi > 0$ , то согласно (1.10) и теореме о среднем [6] для интеграла

$$P\{\xi \leq \xi < \xi + \Delta\xi\} = p(\xi)\Delta\xi + o(\Delta\xi). \quad (1.11)$$

Заметим, что для непрерывной случайной величины на всем интервале распределения

$$P\{\xi = \xi\} = F(\xi + 0) - F(\xi) = 0, \quad (1.12)$$

так как  $F(\xi)$  непрерывна. Поэтому в формулах (1.10) и (1.11) строгие неравенства в событиях могут быть заменены на нестрогие.

Очевидно, что

$$\int_{-\infty}^{\infty} p(y)dy = F(+\infty) = 1. \quad (1.13)$$

Примером непрерывной случайной величины, в частности, является нормальная  $N(M, \sigma^2)$  случайная величина с плотностью распределения

$$p(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\xi-M)^2}{2\sigma^2}}. \quad (1.14)$$

### *Случайные погрешности измерений*

Погрешности, меняющие величину и знак от опыта к опыту, называют *случайными*.

*Случайные погрешности* могут быть связаны с трением (из-за которого приборная стрелка вместо того чтобы останавливаться в правильном положении, «застревает» вблизи него), с люфтами в механических приспособлениях, с тряской, которую в городских условиях трудно исключить, с несовершенством объекта измерений (например, при измерении диаметра проволоки, которая из-за случайных причин, возникающих при изготовлении, имеет не вполне круглое сечение) или с физическими особенностями самой измеряемой величины.

Случайные величины, к которым относятся *случайные погрешности*, изучаются в теории вероятностей и в математической статистике [4].

Рассмотрим для примера данные, полученные при измерениях размера детали с помощью штангенциркуля. Пусть размер детали близок к 48 мм, и результат измерений удастся отсчитать по шкале с точностью до 0,1 мм. Допустим, имеем результаты в миллиметрах: 48,0; 47,9; 47,5; 48,2; 48,4; 47,8; 48,6; 48,3; 47,8; 48,1; 48,2. Вместо одного нужного нам результата мы получили одиннадцать. Что делать с полученными цифрами? Как найти действительное

значение размера детали и как оценить погрешность полученного результата? Этот вопрос подробно изучается в математической статистике, мы же рассмотрим соответствующие правила без выводов.

В качестве наилучшего значения для измеренной величины обычно принимают среднее арифметическое из всех полученных результатов:

$$X_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i, \quad (1.15)$$

в нашем примере получим

$$X_{cp} = \frac{1}{11} (48,0 + 47,9 + \dots + 48,1 + 48,2) = 48,1 \text{ мм.}$$

Этому результату следует приписать погрешность, определяемую формулой

$$\sigma_{\Delta X} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{cp})^2}. \quad (1.16)$$

В нашем случае

$$\sigma_{\Delta X} = \frac{1}{11} \sqrt{(48,0 - 48,1)^2 + (47,9 - 48,1)^2 + \dots + (48,2 - 48,1)^2} = 0,1 \text{ мм.}$$

Результат опыта записывается в виде

$$X = X_{cp} \pm \sigma_x. \quad (1.17)$$

В нашем случае  $X = (48,1 \pm 0,1) \text{ мм.}$

Рассмотрим формулы (1.15) и (1.16). Прежде всего, попытаемся понять, как зависит результат расчета от числа измерений.

Формула (1.15) показывает, что  $X_{cp}$  слабо зависит от числа измерений. Все слагаемые, входящие в числитель, приблизительно равны друг другу. Их сумма пропорциональна числу слагаемых. После деления на знаменатель получается величина, мало зависящая от числа измерений. Так, конечно, и должно быть. Среднее измеренное значение, при правильной

методике опыта, всегда лежит вблизи истинного значения и в разных независимых сериях измерений испытывает вокруг него небольшие случайные колебания.

Погрешность опыта, определяемая формулой (1.16), с увеличением числа измерений  $n$  уменьшается как  $\sqrt{n}$ :

$$\sigma \approx 1/\sqrt{n}. \quad (1.18)$$

(Число членов суммы в (1.16) растет как  $n$ , числитель (1.16) поэтому увеличивается как  $\sqrt{n}$ , а все выражение уменьшается как  $\sqrt{n}$ .)

Этот результат является очень важным. По мере увеличения числа опытов ошибки в сторону преувеличения и преуменьшения результата все лучше компенсируют друг друга, и среднее значение приближается к *истинному*. В нашем примере одиночные отсчеты отличаются от среднего на несколько десятых, а погрешность результата, полученного при усреднении всех измерений, составляет всего одну десятую.

Корень из  $n$  определяет среднеквадратичную погрешность одного измерения. При обсуждении смысла величины  $\sigma$  следует помнить, что истинную величину погрешности невозможно узнать до тех пор, пока из каких-либо других опытов (или соображений) не удастся определить искомую величину с существенно лучшей точностью.

Как уже отмечалось, погрешность результата не столько определяют, сколько оценивают. Оценка (1.16) подобрана так, что при проведении многочисленных серий измерений погрешность в 2/3 случаев оказывается меньше  $\sigma_{\Delta x}$ , а в 1/3 случаев больше, чем  $\sigma_{\Delta x}$ .

Иначе говоря, если провести не одну серию из 11 измерений, а десять таких серий, то можно ожидать, что в шести или семи из них усредненный результат будет отличаться от истинного размера детали меньше, чем на 0,1 мм, а в остальных случаях - больше, чем на 0,1 мм.

Погрешность, определенную с достоверностью  $2/3$ , обычно называют *стандартной* (или *среднеквадратичной*) *погрешностью измерений*, а ее квадрат – *дисперсией*. Можно показать, что, как правило, погрешность опыта только в 5 % случаев превосходит  $\pm 2\sigma$  и почти всегда оказывается меньше  $\pm 3\sigma$ .

На первый взгляд из сказанного можно сделать вывод, что, беспредельно увеличивая число измерений, можно даже с самой примитивной аппаратурой получить очень хорошие результаты. Это, конечно, не так. С увеличением числа измерений уменьшается только случайная погрешность опытов. Методические погрешности и погрешности, связанные с несовершенством приборов (например, с неправильностью их шкал), при увеличении числа опытов ведут себя скорее наоборот и в лучшем случае не меняются.

В приведенном выше примере результат округлялся до десятых долей миллиметра. Это делалось потому, что сотых долей отсчитать было нельзя. Ошибка отсчета составляла при этом около  $0,1$  мм. Поэтому погрешность результата ни при каком числе опытов не может быть сделана меньше.

Число опытов в нашем случае было выбрано разумно. Из приведенных в таблице цифр ясно, что при однократном измерении можно ошибиться на несколько десятых. Среди цифр встречаются результаты, отличающиеся на  $0,3$  и даже на  $0,5$  от среднего. После усреднения по  $11$  измерениям погрешность существенно уменьшилась. Но если окажется нужным узнать размеры детали с лучшей точностью, то недостаточно просто увеличить число измерений. Придется взять более точный прибор, позволяющий производить измерения не до десятых, а, скажем, до сотых долей миллиметра.

Необходимо заметить, что формула (1.16) позволяет хорошо оценивать величину стандартной погрешности только в тех случаях, когда число опытов оказывается не меньше  $4 \div 5$ . При меньшем числе опытов лучше применять другие, более сложные оценки. Однако надежность всех этих оценок при малом числе измерений оказывается невысокой.

### ***Систематические погрешности***

*Систематические погрешности* сохраняют свою величину (и знак!) во время эксперимента. Они могут быть связаны с ошибками приборов (неправильная шкала, неравномерно растягивающаяся пружина, неравномерный шаг микрометрического винта, не равные плечи весов) и с самой постановкой опыта (определение скорости поезда по проходимому им расстоянию на участке, где движение происходит с небольшим ускорением, которое ускользнуло от внимания оператора, влияние трения и т. д.). В результате *систематических погрешностей*, разбросанные из-за случайных ошибок результаты опыта колеблются не вокруг истинного, а вокруг некоторого смещенного значения.

*Рис. 1.4* поясняет различие между *случайными* и *систематическими* погрешностями.

В ситуации, изображенной на *рис. 1.4а*, *систематическая погрешность* пренебрежимо мала. Измеренные значения отличаются от истинного вследствие случайных ошибок опыта. На *рис. 1.4б* изображены результаты опыта при наличии как *случайных*, так и *систематических погрешностей*.

*Систематические погрешности* опыта могут быть изучены и скомпенсированы путем внесения поправок в результаты измерений. В частности, *неравноплечность весов* при взвешивании можно учесть, меняя местами грузы на чашках весов; *неточность шкал* электроизмерительных приборов можно установить, сравнивая их показания с показаниями более точных приборов, и т. д.

Различие между *случайными* и *систематическими* погрешностями не является абсолютным. Оно связано с постановкой измерительного эксперимента.



Рис. 1.4. Разброс результатов вокруг истинного значения при отсутствии (а) и при наличии (б) систематической погрешности

Например, производя измерения электрического тока несколькими разными амперметрами, систематическую ошибку, связанную с неточностью шкалы, мы превращаем в случайную, величина (*и знак!*) которой зависит от того, какой поставлен амперметр в данном опыте и т. д.

Однако, во всяком конкретном опыте (при заданной его постановке) *различие между систематическими и случайными погрешностями всегда можно и нужно устанавливать с полной определенностью.*

Оценку систематических погрешностей экспериментатор производит, анализируя особенности методики, паспортную точность приборов и производя контрольные опыты.

Отметим различие в правилах определения погрешностей и в определении класса точности.

Погрешности принято характеризовать среднеквадратичными ошибками. При многочисленных измерениях реальная ошибка опытов только в  $2/3$  случаев меньше среднеквадратичной, а в  $1/3$  случаев превосходит ее.

Класс точности определяет максимально возможное значение погрешности. Приборы, которые могут давать хотя бы иногда бо́льшие погрешности, должны быть отнесены к другому классу.

Такое различие в определениях неудобно. В научных публикациях принято приводить именно среднеквадратичную ошибку, а вовсе не максимальную. Строгих формул для перевода одних по-

грешностей в другие не существует, поэтому можно пользоваться следующим простым правилом: *чтобы оценить среднеквадратичную погрешность измерений приборами, следует погрешность, определяемую классом точности прибора, разделить на два.*

Как уже отмечалось, класс приборов определяет максимальную погрешность, величина которой не меняется при переходе от начала к концу шкалы. Относительная ошибка при этом резко меняется, поэтому приборы обеспечивают хорошую точность при отклонении на всю шкалу и не дают ее при измерениях в начале шкалы.

Отсюда следует рекомендация: *выбирать прибор (или шкалу многошкального прибора) так, чтобы стрелка прибора при измерениях заходила за середину шкалы.*

Говоря о систематических погрешностях измерений в механике, следует сказать несколько слов об ошибке отсчета «на глаз». Большинство приборов не имеет *нонусных шкал*. При этом доли деления отсчитываются на глаз. Эта ошибка составляет 1-2 десятых доли деления. При отсчетах следует следить за тем, чтобы луч зрения был перпендикулярен шкале. Для облегчения установки глаза на многих приборах устанавливается зеркало (зеркальные приборы). Глаз оператора установлен правильно, если стрелка прибора закрывает свое изображение в зеркале. При работе с электроизмерительными приборами отсчет должен включать число целых делений и число десятых долей деления, если отсчет может быть произведен с этой точностью (если стрелка или зайчик не ходят и не дрожат, что может сделать аккуратный отсчет невозможным).

Поясним указанное правило. Шкалы электроизмерительных приборов обычно изготавливают так, что одно деление шкалы приблизительно равно максимальной погрешности прибора. Зачем же в этом случае отсчитывать десятые доли деления? Дело в том, что при измерениях, при расчетах и при записи результатов кроме надежно известных значащих цифр всегда указывается одна лишняя. Такая процедура, среди прочих, имеет и то преимущество, что позволяет вовремя замечать мелкие нерегулярности и исследуемых

зависимостей. Если, например, стрелка прибора при измерениях отклонилась на половину деления назад, этот результат является надежным и в том случае, когда погрешность прибора равна целому делению.

Несколько слов о точности линеек. Металлические линейки очень точны: миллиметровые деления наносятся с погрешностью не более  $\pm 0,05$  мм, а сантиметровые – не хуже, чем с точностью  $0,1$  мм. Погрешность измерений, производимых с помощью таких линеек, практически равна погрешности отсчета на глаз. Деревянными или пластиковыми линейками лучше не пользоваться: их погрешности неизвестны и могут оказаться неожиданно большими. Исправный микрометр обеспечивает точность  $0,01$  мм, а погрешность измерений штангенциркулем определяется точностью, с которой может быть сделан отсчет, т. е. точностью нониуса (у штангенциркулей цена делений нониуса составляет обычно  $0,1$  или  $0,05$  мм).

#### 1.4.1. Сложение случайных и систематических погрешностей

В реальных опытах присутствуют как систематические, так и случайные ошибки. Пусть они характеризуются стандартными погрешностями  $\sigma_{\text{сист}}$  и  $\sigma_{\text{случ}}$ . Суммарная погрешность находится по формуле

$$\sigma_{\text{полн}}^2 = \sigma_{\text{случ}}^2 + \sigma_{\text{сист}}^2. \quad (1.19)$$

Поясним эту формулу. Систематическая и случайная ошибки могут, в зависимости от случая, складываться или вычитаться друг из друга. Как уже говорилось, точность опытов принято характеризовать не максимальной (и не минимальной), а среднеквадратичной погрешностью. Поэтому правильно рассчитанная погрешность должна быть меньше суммы  $\sigma_{\text{случ}} + \sigma_{\text{сист}}$  и больше их разности  $\sigma_{\text{случ}} - \sigma_{\text{сист}}$ . Легко видеть, что  $\sigma_{\text{полн}}$ , определенная формулой (1.19), удовлетворяет этому условию. В самом деле, все величины  $\sigma$  – положительные.

Поэтому

$$\sigma_{полн}^2 = \sigma_{случ}^2 + \sigma_{сист}^2 \leq \sigma_{случ}^2 + 2\sigma_{случ} \sigma_{сист} + \sigma_{сист}^2 = (\sigma_{случ} + \sigma_{сист})^2. \quad (1.20)$$

Знак равенства возникает только в том случае, когда одна из погрешностей равна нулю. Аналогично имеем

$$\sigma_{полн}^2 \geq \sigma_{случ}^2 - 2\sigma_{случ} \sigma_{сист} + \sigma_{сист}^2 = (\sigma_{случ} - \sigma_{сист})^2. \quad (1.21)$$

Формула (1.19) показывает, что при наличии как случайной, так и систематической погрешности полная ошибка опыта больше, чем каждая из них в отдельности, что также является вполне естественным.

Обратим внимание на еще одну важную особенность формулы (1.19). Пусть одна из ошибок, например  $\sigma_{случ}$ , в 2 раза меньше другой. Тогда

$$\sigma_{полн} = \sqrt{\sigma_{случ}^2 + \sigma_{сист}^2} = \sqrt{5/4} \sigma_{сист} \approx 1,12 \sigma_{сист}.$$

*Как мы уже говорили, погрешности редко удается оценить с точностью лучше 20 %. Но в нашем примере с точностью 20 %  $\sigma_{полн} = \sigma_{сист}$ . Таким образом, меньшая погрешность почти ничего не добавляет к большей, даже если она составляет половину от нее.*

Этот вывод очень важен. В том случае, если случайная ошибка опытов вдвое меньше систематической, нет смысла производить многократные измерения, так как полная погрешность опыта при этом практически не уменьшается. Измерения достаточно произвести 2-3 раза, чтобы убедиться, что случайная ошибка действительно мала.

#### 1.4.2. Обработка результатов при косвенных измерениях

Если исследуемая величина равна сумме или разности двух измеренных величин

$$A = B \pm C, \quad (1.22)$$

то наилучшее значение величины  $A$  равно сумме (или разности) наилучших значений слагаемых:  $A_{наил} = B_{наил} + C_{наил}$ , или, как рекомендовано выше,

$$A_{\text{наил}} = \langle B \rangle \pm \langle C \rangle. \quad (1.23)$$

Здесь и в дальнейшем угловые скобки (или черта сверху) означают усреднение. Вместо того, чтобы писать  $A_{cp}$ , будем пользоваться обозначением  $\langle A \rangle$  (или  $\bar{A}$ ) и т. д.

Среднеквадратичная погрешность  $\sigma_A$ , если величины  $B$  и  $C$  независимы, находится по формуле

$$\sigma_A = \sqrt{\sigma_B^2 + \sigma_C^2}, \quad (1.24)$$

т. е. погрешности, как всегда, складываются квадратично. (Иначе говоря, складываются не погрешности, а дисперсии результатов измерений.) При обсуждении формулы (1.24) следует использовать те же аргументы, которые были приведены в связи с формулой (1.19).

В том случае, если искомая величина равна произведению или частному двух других

$$A = B \cdot C \text{ или } A = B/C, \quad (1.25)$$

то

$$A_{\text{наил}} = \langle B \rangle \cdot \langle C \rangle \text{ или } A_{\text{наил}} = \frac{\langle B \rangle}{\langle C \rangle}. \quad (1.26)$$

*Относительная среднеквадратичная погрешность произведения и частного независимых величин находится по формуле*

$$\frac{\sigma_A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_C}{C}\right)^2}. \quad (1.27)$$

Приведем расчетные формулы для случая, когда

$$A = B^{\beta} \cdot C^{\gamma} \cdot E^{\epsilon} \cdot \dots \quad (1.28)$$

Наилучшее значение  $A$  связано с наилучшими значениями  $B$ ,  $C$ ,  $E$  и т. д. той же формулой (1.24), что и каждое конкретное значение.

Относительная среднеквадратичная погрешность величины  $A$  при независимых  $B, C, E...$  находится по формуле

$$\left(\frac{\sigma_A}{A}\right)^2 = \beta^2 \left(\frac{\sigma_B}{B}\right)^2 + \gamma^2 \left(\frac{\sigma_C}{C}\right)^2 + \varepsilon^2 \left(\frac{\sigma_E}{E}\right)^2 + \dots \quad (1.29)$$

Наконец, приведем для справок общую расчетную формулу. Пусть

$$A = f(B, C, E, \dots), \quad (1.30)$$

где  $f$  – произвольная функция величин  $B, C, E$  и т. д. Тогда

$$A_{\text{наил}} = f(B_{\text{наил}}, C_{\text{наил}}, E_{\text{наил}}, \dots). \quad (1.31)$$

Формула (1.31) справедлива как в том случае, когда  $B_{\text{наил}}, C_{\text{наил}}$ , и т. д. непосредственно измерены, так и в том случае, если они найдены по измеренным значениям других величин. В первом случае значения  $B_{\text{наил}}, C_{\text{наил}}$ , и т. д., как уже указывалось, равны  $\langle B \rangle, \langle C \rangle$  и т. д. Погрешность  $A$  находится по формуле

$$\sigma_A^2 = \left(\frac{df}{dB}\right)^2 \cdot \sigma_B^2 + \left(\frac{df}{dC}\right)^2 \cdot \sigma_C^2 + \left(\frac{df}{dE}\right)^2 \cdot \sigma_E^2 + \dots \quad (1.32)$$

Частные производные следует вычислять при наилучших значениях аргументов. Все приведенные в этом параграфе формулы являются частными случаями (1.31) и (1.32).

Рассмотрим некоторые следствия, которые могут быть получены из анализа формул, приведенных в этом разделе. Прежде всего заметим, что *следует избегать измерений, при которых искомая величина находится как разность двух больших чисел*. Так, толщину стенки трубы не следует определять, вычитая ее внутренний диаметр из внешнего диаметра и конечно деля результат пополам. Относительная погрешность измерения, которая обычно представляет главный интерес, при этом сильно увеличивается, так как измеряемая величина – в нашем случае толщина стенки – мала, а ошибка в ее определении находится путем сложения погрешностей измерения обоих диаметров и поэтому возрастает.

Следует также помнить, что погрешность измерения, которая составляет, например, 0,5 % от величины внешнего диаметра, может составить 5 % и более от толщины стенки.

*При измерениях, которые затем обрабатываются по формуле (1.32) (например, при определении плотности тела по его массе и объему), следует определять все измеряемые величины с приблизительно одинаковой относительной точностью.*

Так, если объем тела измерен с погрешностью 1 %, то при взвешивании с погрешностью 0,5 % его плотность определяется с точностью 1,1 %, а при взвешивании с погрешностью 0,01 % – с точностью 1 %, т. е. с той же, практически, точностью. Тратить силы и время на измерение массы тела с точностью 0,01 % в этом случае, очевидно, не имеет смысла.

*При измерениях, которые обрабатываются по формуле (1.32), следует обращать главное внимание на точность измерения величины, входящей в расчетную формулу с наибольшим показателем степени.*

Прежде чем приступать к измерениям, всегда нужно подумывать о последующих расчетах и выписать формулы, по которым будут рассчитываться погрешности. Эти формулы позволят понять, какие измерения следует производить особенно тщательно, а на какие не нужно тратить больших усилий.

### **1.4.3. Запись результатов измерений. Точность расчетов**

Результат измерения записывается в виде, определяемом формулой (1.17). Запись  $m = 0.876 \pm 0.008 \text{ г}$  означает, что в результате измерений для массы тела найдено значение 0,876 г со стандартной погрешностью 0,008 г. Подразумевается, что при вычислении стандартной погрешности учтены как случайные, так и систематические ошибки.

При записи погрешности следует округлять ее величину до двух значащих цифр, если первая из них является единицей, и до одной значащей цифры - во всех остальных случаях.

Так, правильно писать  $\pm 3$ ;  $\pm 0.2$ ;  $\pm 0.08$ ;  $\pm 0.14$  и не следует писать  $\pm 3.2$ ;  $\pm 0.23$ ;  $\pm 0.084$ . Не следует также округлять  $\pm 0.14$  до  $\pm 0.1$ .

*Поясним это правило.* Уже говорилось, что погрешность эксперимента редко удастся определить с точностью лучше 20 %. Если вычисление стандартной ошибки приводит к 0.14, то округление 0.14 до 0.1 изменяет величину погрешности на целых 40 %, в то время как округление до 0.3 числа 0.26 или 0.34 изменяет погрешность менее чем на 15 %, т. е. незначительно.

При записи измеренного значения *последней должна указываться цифра того десятичного разряда, который использован при указании погрешности.* Один и тот же результат с указанием погрешности запишется в виде:  $1.2 \pm 0.2$ ;  $1.24 \pm 0.03$ ;  $1.243 \pm 0.012$  и т. д.

Последняя из указанных цифр, или даже две из них, как в последнем примере, оказывается *сомнительной*, а остальные – *достоверными*.

Сформулированное правило следует применять и в тех случаях, когда некоторые из цифр являются нулями. Если при измерении получен результат  $m = 0.900 + 0.004$  г, то писать нули в конце числа 0.900 необходимо. Запись  $m = 0.9$  означала бы, что о следующих значащих цифрах ничего не известно, в то время как измерения показали, что они равны нулю. Аналогичным образом, если масса тела равна 58.3 кг (с погрешностью в десятых долях килограмма), то не следует писать, что она равна 58 300 г, так как эта запись означала бы, что тело взвешено с точностью несколько граммов. Если результат взвешивания должен быть выражен в граммах, то в нашем случае нужно писать  $5.83 \cdot 10^4$  г.

Необходимая точность расчетов определяется тем, что расчет не должен вносить в измерения дополнительной погрешности. Обычно в промежуточных расчетах сохраняется один лишний знак, который в дальнейшем при записи окончательного результата будет отброшен.

#### 1.4.4. Изображение экспериментальных результатов на графиках

Результаты экспериментов обычно представляют не только в виде таблиц, но и в графической форме. Для графиков следует использовать специальную бумагу (миллиметровую, логарифмическую или полулогарифмическую). При их отсутствии иногда приходится (хотя это крайне нежелательно!) пользоваться бумагой «в клеточку» или белой бумагой, на которой карандашом нанесена сетка. Не следует выбирать слишком малый или слишком большой лист бумаги. Удобна бумага размером в обычный тетрадный лист (или в развернутый лист). Полезно пользоваться листами миллиметровки из блокнотов (или планшетов) для диаграмм.

*При построении графиков следует разумно выбирать масштабы, чтобы измеренные точки располагались на всей площади листа.* Масштаб должен быть удобным. Клеточка графика (или миллиметр миллиметровой бумаги) может соответствовать 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10 и т. д. единицам измеряемой величины, но не 2,5; 3; 4; 7 и т. д. При неудобном масштабе нанесение экспериментальных точек на график и использование графика требуют неоправданно большого времени и нередко сопровождаются досадными ошибками.

Графическое представление результатов позволяет быстро понять характерные черты наблюдаемой зависимости и обнаружить ошибочные результаты. *При рассмотрении графика можно увидеть, что какая-либо точка выпадает из закономерности.* Это может означать, что при ее измерении была допущена ошибка. Если это не так, то в районе этой точки искомая зависимость имеет резко выраженную особенность. Именно такие особенности и представляют наибольший интерес для экспериментатора. Поэтому нужно внимательно промерить область, расположенную вблизи выпавшей точки, и постараться детально изучить форму кривой в районе найденной особенности.

*Точки, наносимые на графики, должны изображаться четко и ясно.* Их следует отмечать карандашом, так как иначе ошибочно

нанесенную точку нельзя удалить с графика, не испортив его. Никаких линий и отметок, поясняющих построение точек, на график наносить нельзя, так как они загромождают рисунок и мешают анализировать результаты.

*Точки, полученные в разных условиях (при нагревании и при охлаждении, при увеличении и при уменьшении нагрузки, в разные дни и т. д.), полезно наносить разными цветами или разными значками. Это помогает увидеть новые явления.*

Способ изображения на графике экспериментальных результатов зависит от того, известна ли их случайная погрешность. *Если случайная погрешность неизвестна (что чаще всего и бывает), то результаты изображаются точками, а если известна, то лучше изображать их не точками, а крестами (см. рис. 1.5).*

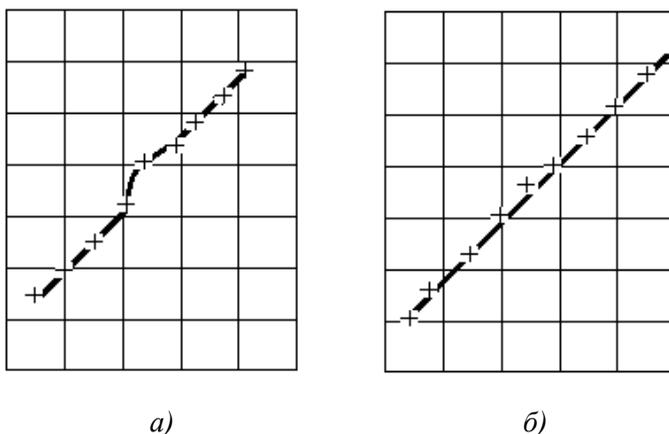


Рис. 1.5. Пример графического изображения экспериментальных результатов

*Полуразмер креста по горизонтали должен быть равен стандартной погрешности по оси абсцисс, а его вертикальный полуразмер – погрешности по оси ординат.* В том случае, если одна из ошибок – из-за своей малости – не может быть изображена графически, результаты изображаются черточками, вытянутыми на величину  $\pm\sigma$  в том направлении, где погрешность не мала. Важность такого способа изображения результатов ясна из рисунков,

на которых изображены одни и те же экспериментальные точки при разных погрешностях измерений.

График *рис. 1.5а*, несомненно, указывает на нерегулярный ход изучаемой зависимости. Эта зависимость изображена на рисунке кривой линией.

Те же данные при больших ошибках опыта *рис. 1.5б* с успехом описываются прямой линией, так как только одно измерение отстает от этой кривой больше, чем на стандартную ошибку (и меньше, чем на две такие ошибки).

То обстоятельство, что при ошибках на *рис. 1.5а* данные требуют проведения кривой, а на *рис. 1.5б* этого не требуют, проявляется лишь при изображении экспериментальных результатов в виде *креста погрешностей*.

Из сказанного отнюдь не следует, что, изображая результаты опытов не крестами погрешностей, а простыми точками, мы всегда совершаем ошибку. Если величины погрешностей уже ясны при построении графика, следует, конечно, их изображать. Чаше всего, однако, эти погрешности к моменту построения графика неизвестны, и их разумно определять из разброса точек на графике. В этих случаях экспериментальные данные естественно изображать простыми точками.

Заметим также, что кривые на графиках не всегда проводятся через экспериментальные точки. Нередко кривые изображают зависимость, полученную не из эксперимента, а из теоретических соображений (или из других опытов). При построении таких кривых возникает необходимость предварительно нанести на график ряд расчетных точек. Эти точки должны наноситься еле заметным образом, чтобы их нельзя было спутать с четкими точками (или крестами), изображающими экспериментальные данные. Лучше всего, чтобы расчетные точки вообще не были заметны.

Оси графика должны иметь ясные, четкие обозначения. Рядом с делениями, на удобных расстояниях должны быть нанесены цифры, позволяющие установить значения, соответствующие

ющие делениям шкалы. Цифры принято располагать по краям сетки. На графиках должно быть указано, какая физическая величина и в каком масштабе на ней отложена.

#### **1.4.5. Проведение кривых через экспериментальные точки**

*Через экспериментальные точки всегда следует проводить самую простую кривую, совместимую с этими точками, т. е. кривую, от которой экспериментальные данные отступают, как правило в 2/3 случаев, не более чем на стандартную ошибку. Примеры таких кривых и изображены на рисунке. Не следует придавать кривым никаких изгибов, если экспериментальным данным, в пределах ошибок, можно удовлетворить и без этого.*

*При проведении кривой нужно следить за тем, чтобы на каждом достаточно большом ее участке экспериментальные точки располагались как выше, так и ниже кривой. Так, на рис. 1.5а левая часть зависимости изображена верно, а правая – неверно, т. к. ни одна из точек графика не лежит выше этой части кривой.*

*Математическое правило проведения кривых заключается в следующем. После того, как тип кривой (прямая, окружность, парабола и т. д.) из тех или иных соображений (чаще всего теоретических) выбран, параметры кривой должны быть подобраны так, чтобы сумма квадратов отклонения от нее всех экспериментальных точек была наименьшей (*правило «наименьших квадратов»*). Пользоваться этим правилом при графическом изображении экспериментальных зависимостей затруднительно, но при некотором опыте графические изображения данных измерений оказываются практически оптимальными.*

*При графической обработке результатов следует помнить, что на глаз точно провести через экспериментальные точки можно только прямую линию. Поэтому при построении графика следует стремиться к тому, чтобы ожидаемая зависимость имела вид прямой линии.*

Так, исследуя закон падения тел, мы вправе ожидать, что результаты будут описываться законом  $S = gt^2/2$ . Если откладывать по осям графика  $S$  и  $t$ , то точки лягут на параболу, которую проверить на глаз почти невозможно. Но если откладывать по осям  $S$  и  $t^2$  или  $S$  и  $gt^2/2$ , то график приобретет вид прямой линии. Одно из этих представлений и должно быть выбрано для построения графика.

*Производя измерения, всегда следует заботиться о том, чтобы точки на графике, который потом будет построен, располагались достаточно равномерно.* В нашем примере, решив строить график в переменных  $S$  и  $t^2$ , следует выбирать время измерений так, чтобы точки лежали на равных расстояниях в шкале  $t^2$ , а не  $t$ . Выбор равных интервалов времени (0,5; 1; 1,5; 2 с и т. д.) приведет к тому, что в правой части графика точки будут лежать редко, а в левой части – слишком близко друг к другу.

К логарифмическому масштабу без особой необходимости прибегать не следует.

Одна из наиболее часто встречающихся погрешностей опыта – смещение нуля отсчета – приводит к сильному искажению прямолинейного характера кривой. В самом деле, пусть из-за смещения линейки вместо длин  $S$  на опыте будет найдено  $S_l = S + a$ , где  $a$  – постоянная для всех точек ошибка. Формула, связывающая измеренную длину и время, в этом случае будет иметь вид  $S_l = (gt^2/2) + a$ . В координатах  $S$  и  $t^2$  эта зависимость изображается прямой линией, которая на этот раз не проходит через начало координат. По смещению прямой мы легко заметим ошибку и даже найдем ее величину. А в переменных  $lgS$  и  $lgt$  кривая теряет прямолинейный вид, и будет нелегко сообразить, где же вкралась ошибка.

Бывают, однако, случаи, когда логарифмический масштаб необходим. Это происходит, например, если исследуемая величина очень сильно изменяется, причем одновременно интересны очень малые и очень большие ее значения. Логарифмический масштаб позволяет все точки уместить на одном чертеже и исследовать совместно. Логарифмический масштаб выбирают и в том случае, если имеются основания ожидать, что искомая зависимость является степенной, но показатель степени неизвестен.

### 1.4.6. Определение искомых параметров по результатам измерений

Очень часто цель экспериментов заключается в том, чтобы из опыта найти неизвестный параметр в известной формуле.

Так, на Земле падение тел описывается формулой  $S = gt^2/2$ , но величина  $g$  меняется от одного участка земной поверхности к другому и подлежит экспериментальному определению.

Радиоактивный распад подчиняется формуле

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (1.33)$$

где  $N$  – количество атомов вещества в момент  $t$ ,  $N_0$  – начальное число атомов, а  $\lambda$  – *постоянная распада*. Закон распада имеет один и тот же вид для всех ядер, но *постоянная*  $\lambda$  у каждого из них своя и определяется экспериментально.

Растяжение тел описывается формулой

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{E} \frac{F}{S}, \quad (1.34)$$

где  $L$  – длина образца,  $\Delta L$  – его удлинение под действием силы  $F$ ,  $S$  – площадь образца,  $E$  – константа (модуль упругости). Написанная формула, при небольших силах, описывает растяжение всех твердых тел, но величина модуля упругости зависит от материала, его обработки и т. д. Эта величина находится экспериментально. Пусть опыт состоит в определении модуля упругости. Экспериментатор измеряет  $L$  и  $S$  и записывает формулу в виде

$$E = \frac{L}{S} \frac{F_1}{\Delta L_1}. \quad (1.35)$$

Затем тело растягивают и составляют таблицу зависимости удлинения от приложенной силы. Каждое из полученных значений заносится в таблицу и определяет свое значение  $E$ . Эти значения из-за погрешностей опыта несколько отличаются друг от друга. Нередко при обработке результатов найденные таким образом значения модуля упругости усредняют. Это плохой и математически некорректный метод.

Поясним наше утверждение.

На *рисунке 1.6* точками изображены результаты 11 опытов (разброс точек для наглядности увеличен). Первое из равенств соответствует прямой, проведенной из начала координат через точку 1. В самом деле, из этого равенства имеем

$$E = \frac{L}{S} \frac{F_1}{\Delta L_1}. \quad (1.36)$$

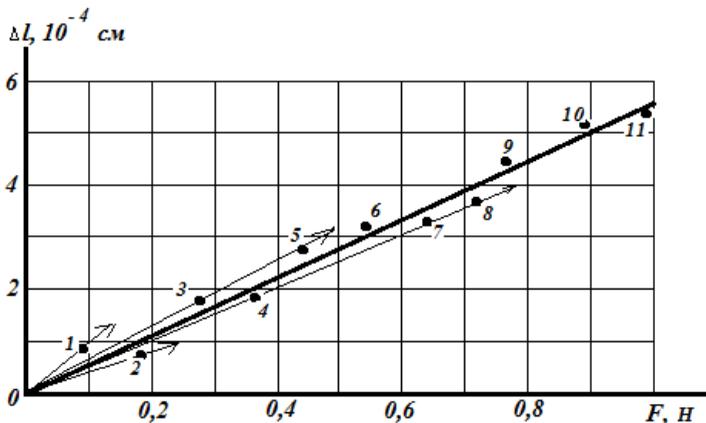


Рис. 1.6. Результаты опытов по определению модуля упругости

С точностью до постоянного для всех точек коэффициента пропорциональности  $L/S$  значение модуля упругости  $E$  равно котангенсу угла, образованного осью абсцисс и прямой, проведенной из начала координат в эту точку. Второе из равенств соответствует прямой линии, проведенной через точку 2, и т. д. Усреднение величин  $E$ , полученных во всех опытах, означает усреднение котангенсов указанных углов.

Рисунок показывает, однако, что усредняемые величины определяются из опыта с разной достоверностью. Точка 8 находится на расстоянии от наилучшей прямой (которая проведена жирной линией) не ближе, чем точка 3, но погрешность в определении угла для нее в несколько раз меньше. Обсуждаемый способ определения  $E$  заключается, таким образом, в том, чтобы взять

среднее из хороших и плохих результатов. Такая процедура, конечно, математически некорректна.

Иногда пытаются найти  $E$  из прироста длины и силы на каждом шаге растяжения:

$$F_2 - F_1 = \frac{S}{L} E(\Delta L_2 - \Delta L_1), \quad F_3 - F_2 = \frac{S}{L} E(\Delta L_3 - \Delta L_2) \quad (1.37)$$

и т. д. При этом возникает много вычислительной работы и получается новый ряд значений  $E$ , которые также чаще всего усредняют. И этот способ неправилен. Пусть, для примера, опыт ставится в условиях, когда все приращения длины равны друг другу. Тогда

$$E_1 = \frac{L}{S} \frac{1}{\Delta L} (F_2 - F_1), \quad E_2 = \frac{L}{S} \frac{1}{\Delta L} (F_3 - F_2) \text{ и т. д.} \quad (1.38)$$

При усреднении получим

$$E_{cp} = \frac{1}{n-1} (E_1 + E_2 + \dots + E_{n-1}) = \frac{L}{(n-1)S\Delta L} (F_n - F_1). \quad (1.39)$$

Таким образом, все найденные на опыте значения силы при усреднении сокращаются, и результат зависит только от первого и последнего опытов. Значит, при такой обработке мы на самом деле не усреднили результаты, полученные в разных опытах, а просто исключили из рассмотрения почти все полученные на опыте данные. Ясно, что такой метод нельзя признать разумным.

Математическая причина ошибок очевидна: разумно усреднять результаты только в том случае, если они являются *равноточными и независимыми*. В первом примере результаты обладали различной точностью, а во втором они не являются независимыми: одно и то же значение силы входит в два соседние равенства. Число примеров при желании можно было бы существенно увеличить.

Наиболее правильным и удобным методом обработки результатов является графический метод. Изобразим удлинения и силы на графике, как это и было сделано на рисунке. То есть, на этом рисунке проведена «наилучшая прямая», удовлетворяющая всем требованиям, которые обсуждались ранее. Наклон этой прямой соответствует изменению длины  $5,7 \cdot 10^{-4}$  см. при увеличении силы на  $1 \text{ Н}$ . Эта цифра может быть прямо подставлена в формулу для вычисления модуля упругости.

При рекомендуемом методе графической обработки результатов – при проведении прямой на глаз – учитываются все точки графика. При этом точки, лежащие по его краям, оказываются более существенными, как это и должно быть. Математически этот способ эквивалентен методу «наименьших квадратов». *Особым преимуществом графического метода является его простота.*

Еще одно замечание о построении таких графиков. Часто случается, что начальная точка искомой зависимости хорошо известна и лежит в начале координат.

Как бы ни была сложна зависимость тока, проходящего через проводник, от приложенного к нему напряжения, можно быть уверенным, что при отсутствии напряжения нет и тока (мы предполагаем, что в цепи не возникает *термо-э.д.с.*, при отсутствии силы – нет удлинения, если тело не нагревать и не охлаждать, то изменение его температуры равно нулю, и т. д.).

Во всех этих случаях нулевая точка не просто известна, она является самой надежной из всех, которые используются при обработке результатов, а задача проведения наилучшей прямой сводится в этом случае к подбору параметра в формуле  $y=kx$ . В общем случае нужно найти параметры  $a$  и  $b$  в формуле  $y=a+bx$ .

Приведем правила для определения погрешностей, которые следует приписывать графически найденным параметрам прямой линии.

Пусть график прямой линии описывается формулой  $y=a+bx$ . Тогда чтобы найти погрешность в определении  $a$ , нужно смещать

прямою, параллельно самой себе, вниз, пока выше нее не окажется вдвое больше точек, чем снизу, затем следует сместить ее вверх, пока снизу не окажется вдвое больше точек, чем сверху. Если расстояние между этими прямыми равно  $\Delta a$ , то погрешность определения  $a$  равна  $\sigma_a = \Delta a / \sqrt{n}$ , где  $n$  – полное число точек на графике. Погрешность в определении  $b$  находится аналогичным образом.

#### 1.4.7. Оценка погрешностей при проведении теплотехнических измерений

В промышленных и лабораторных условиях прямые измерения физических величин выполняются, как правило, *однократно* с помощью рабочих средств измерений.

При проведении теплотехнических измерений используют, как правило, измерительные системы, состоящие из различных средств измерений, поэтому имеет место функциональная зависимость вида (1.30)

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots),$$

а погрешность таких косвенных измерений искомой величины можно определить из выражения вида (1.32) для полного дифференциала:

$$\Delta y = \left( \frac{df}{dx_1} \right) \Delta x_1 + \left( \frac{df}{dx_2} \right) \Delta x_2 + \left( \frac{df}{dx_3} \right) \Delta x_3 + \dots \quad (1.40)$$

Следовательно, для оценки погрешности косвенных теплотехнических измерений можно воспользоваться выражением (1.40).

Как показано выше, при проведении однократных измерений, которые обрабатываются по формуле (1.33), в большинстве практических случаев можно считать производные  $\partial f / \partial x_i$  в пределах изменения соответствующих величин  $x_i$ , равными единице, а  $\Delta x_i$  – абсолютная погрешность прямого однократного измерения величины  $x_i$ .

Для оценки *максимально допустимой погрешности косвенных измерений* часто используют выражение

$$\Delta y = \left( \frac{df}{dx_1} \right) \Delta x_1 + \left( \frac{df}{dx_2} \right) \Delta x_2 + \left( \frac{df}{dx_3} \right) \Delta x_3 + \dots, \quad (1.41)$$

где  $\Delta x_i$  – абсолютная предельная погрешность прямого однократного измерения величины  $x_i$ .

В производственных условиях прямые измерения теплотехнических величин выполняются, как правило, *однократно* с помощью рабочих средств измерений, точность результатов измерения каждой (отдельно взятой) величины оценивается *относительной предельной (максимальной) погрешностью* измерения

$$\Delta_{\Pi} = \pm(\Delta + \Delta_{\text{Д}} + \Delta_{\text{М}}), \quad (1.42)$$

где  $\Delta$  и  $\Delta_{\text{Д}}$  – допустимые основная и дополнительная погрешности измерительного прибора;  $\Delta_{\text{М}}$  – методическая погрешность.

Следует иметь в виду, что этот способ определения погрешностей косвенных измерений дает заведомо завышенные значения  $\Delta y$ , так как предположение о малой вероятности того, что все погрешности  $\Delta x_i$ , входящие в (1.41), с учетом (1.42) максимальны и одновременно одного знака.

В практике теплотехнических измерений основными параметрами являются давление и температура. В этом случае максимальную относительную ошибку отнесения следует рассчитывать по формуле

$$\Delta y = \left( \frac{df}{dT} \right) \Delta T + \left( \frac{df}{dP} \right) \Delta P. \quad (1.43)$$

Значение этой ошибки будет зависеть от интенсивности изменения физической величины под влиянием изменения параметров, т. е. от частных производных.

## **ГЛАВА 2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН**

### **§ 2.1. Измерение температуры**

Температурой называют величину, характеризующую тепловое состояние тела. Согласно молекулярно-кинетической теории [1] температурой называют физическую величину, количественно характеризующую меру средней кинетической энергии теплового движения молекул какого-либо тела или вещества.

Современное теплоэнергетическое производство невозможно без температурного контроля, более того, в большинстве технологических процессов температурный контроль имеет решающее значение. Средство измерения температуры называют термометром.

Из вышеприведенного определения следует, что о температуре можно судить по изменению физических свойств (характеристик) тел: объема, давления, электрического сопротивления, термо-ЭДС, интенсивности излучения и т. д. Эти физические характеристики тел называют термометрическими, и вещества, характеризующиеся такими свойствами, также называются термометрическими.

#### **2.1.1. Температурные шкалы**

Физическая величина, называемая термодинамической температурой, в разных температурных диапазонах определяется по так называемым реперным точкам – фиксированным значениям температур, соответствующих либо тройным точкам, либо плавлению, либо затвердеванию чистых веществ, в основном, чистых металлов.

Вещества с фиксированными температурными характеристиками делятся на определяющие реперные температурные точки и вторичные. Такое подразделение делается по той причине, что у некоторых веществ температуры плавления или отвердевания хорошо воспроизводятся, а для некоторых при воспроизведении наблюдаются заметные расхождения.

Во многих странах Западного полушария и в первую очередь в США общепринятой является *шкала Фаренгейта*. В качестве нижней опорной точки ( $0^{\circ} F$ ) изобретатель шкалы использовал температуру замерзания солевого раствора, самую низкую воспроизводимую в то время, а в качестве верхней точки - температуру тела человека ( $96^{\circ} F$  – в старину было принято считать дюжинами). Сам изобретатель определял вторую эталонную точку как температуру под мышкой здорового англичанина.

Согласно этой шкале, разность температур между таянием льда и кипением воды делится на 180 частей, а температуре таяния льда приписана температура  $32^{\circ} F$ .

Перевод  $^{\circ}C$  в  $^{\circ}F$  легко можно сделать по формуле:

$$T(^{\circ}C) = (5/9) \cdot (T(^{\circ}F) - 32). \quad (2.1)$$

Довольно редко, но все еще встречаются термометры, градуированные в градусах Реомюра. *Шкала Реомюра* строится таким образом, что разность температур плавления льда и кипения воды делится на 80 частей. Причиной этого является тот факт, что спирт с водой (основная жидкость, используемая в термометрах) расширяется между точками замерзания воды и точкой кипения на 8 % своего объема. Размер градуса в *шкале Реомюра* можно воспроизвести изменением объема водно-спиртовой жидкости на  $0,08/80 = 0,001$  первоначального объема. Соответственно, температурные интервалы в *шкалах Кельвина* и *Реомюра* относятся как 100/80 или как 5/4, т. е.

$$T(^{\circ}C) = (5/4)T(^{\circ}R). \quad (2.2)$$

В 1742 году А. Цельсием была предложена шкала, в которой интервал изменения температуры между точкой таяния льда и точкой кипения воды делился на 100 частей. В Международной системе единиц измерений (СИ) градус Цельсия узаконен как производная единица от абсолютной температуры Кельвина, определяемая по формуле:

$$T(^{\circ}C) = T(K) - 273,16. \quad (2.3)$$

В настоящее время основной единицей температуры системы СИ так называемой абсолютной термодинамической шкалы принят градус Кельвина. Градус Кельвина определяется как  $1/273,16$  часть температуры «тройной точки» воды, которая является температурой равновесного состояния водяного пара, жидкой воды и льда. Для воспроизведения единицы температуры по определению Кельвина интервал между абсолютным нулем температуры и температурой тройной точки воды делится на 273,16 части [1].

Для обеспечения единства измерений температуры в качестве международного стандарта в 1968 году принята Международная практическая температурная шкала (*МПТШ-68*).

В 1990 году в соответствии с решением XVIII Генеральной конференции по мерам и весам введена Международная температурная шкала (*МТШ-90*). *МТШ-90*, по сути, является практической температурной шкалой и заменяет собой предыдущую шкалу *МПТШ-68*. Основные изменения в шкале связаны с изменением температур реперных точек, расширением диапазона определения шкалы, введением новых интерполяционных приборов и новых методик построения интерполяционных зависимостей для платиновых термометров сопротивления [2]. Шкала считается очень близко аппроксимирующей термодинамическую шкалу температур, поэтому слово «практическая» было опущено в ее названии. Перечень основных фиксированных точек *МТШ-90* приведен в *табл. 2.1*.

Таблица 2.1

**Перечень основных реперных точек МТШ-90**

Реперная точка	Температура, °К	Температура, °С
Тройная точка водорода	13,8033	-259,3467
Точка кипения равновесного водорода	≈20,3	≈ -252,85
Тройная точка неона	24,5561	-248,5939
Тройная точка кислорода	54,3584	-218,7916
Тройная точка аргона	83,8058	-189,3442
Тройная точка ртути	234,3156	-38,8344

## Продолжение таблицы

Тройная точка воды	273,16	0,01
Точка плавления галлия	302,9146	29,7646
Точка затвердевания индия	429,7485	156,5985
Точка затвердевания олова	505,078	231,928
Точка затвердевания цинка	692,677	419,527
Точка затвердевания алюминия	933,473	660,323
Точка затвердевания серебра	1234,93	961,78

Вторичные точки шкалы *МТШ-90* определены точками затвердевания и кипения следующих веществ: *Hg, H<sub>2</sub>O, Na, Bi, Cd, Pb, Sb, Ni, Co, Pd, Pt, Rh, Jr, W* и ряда других.

Вторичные точки в основном используются в области высоких температур, что дает возможность продлить температурную шкалу до точки плавления вольфрама – до  $3414^{\circ}\text{K}$ .

Международная температурная шкала постоянно развивается и дополняется. Так, в октябре 2000 года Международный комитет по мерам и весам утвердил новую предварительную низкотемпературную международную шкалу *ПНТШ-2000 (PLTS-2000)*, которая расширяет диапазон *МТШ-90* в низкотемпературной области. Шкала начинается с температуры  $0,902^{\circ}\text{K}$ , соответствующей твердому состоянию *He*, и доходит до температуры  $1^{\circ}\text{K}$ , перекрывая таким образом диапазон *МТШ-90* в интервале  $0,65 - ^{\circ}\text{K}$ . Шкала основана на измерении давления при плавлении гелия (*He*).

В июне 2005 года консультативный комитет по термометрии выпустил Техническое приложение к *МТШ-90*, которое получило статус обязательного приложения к тексту шкалы. Дополнение касается определения температуры тройной точки воды и основано на результатах анализа расхождений значений температур ампул тройной точки воды, использующих воду разного изотопного состава.

В качестве эталонного термометра в интервале температур от  $13,81$  до  $903,89^{\circ}\text{K}$  принимается платиновый термопреобразователь сопротивления [2; 3]. Этот интервал разбит на 5 подинтерва-

лов, для каждого из которых определены интерполяционные формулы в виде полиномов до четвертой степени.

В интервале температур от  $903,89$  до  $1337,58^{\circ} K$  используется эталонный платина – платинородиевый термоэлектрический термометр. Интерполяционной формулой, связывающей термо-ЭДС с температурой, здесь является полином второй степени.

Для температур выше  $1337,5^{\circ} K$  МТШ-90 воспроизводится с помощью квазимонохроматического пирометра. Связь между действительной и яркостной температурой тела можно определить, опираясь на закон Планка [2].

### 2.1.2. Классификация средств измерения температуры

Все типы термометров принято разбивать на два класса в зависимости от методики измерений (рис. 2.1).

Традиционный и наиболее массовый вид термометров – контактные термометры, отличительной особенностью которых является необходимость теплового контакта между датчиком термометра и средой, температура которой измеряется.

Вторую группу составляют бесконтактные термометры, для измерения которыми нет необходимости в тепловом контакте среды и прибора, а достаточно измерений собственного теплового или оптического излучения.

Измерение температуры	
Контактные термометры	Бесконтактные термометры
Термометры расширения	Пирометры
Манометрические термометры	Радиометры
Термоэлектрические термометры (термопары)	Тепловизоры
Термометры сопротивления	

Рис. 2.1. Классификация средств измерения температуры

Контактные приборы и методы по принципу действия разделяются на:

а) термометры расширения, принцип действия которых основан на зависимости объемного расширения жидкости и линейных размеров твердых тел от температуры;

б) манометрические термометры, принцип действия которых основан на изменении давления рабочего (термометрического) вещества в зависимости от температуры;

в) термоэлектрические термометры (термопары), принцип действия которых основан на использовании зависимости термоэлектродвижущей силы от температуры;

г) термометры сопротивления, принцип действия которых основан на зависимости электрического сопротивления чувствительного элемента (проводника или полупроводника) от температуры [4].

Бесконтактные методы, в основе которых лежит регистрация собственного теплового или оптического излучения, можно представить следующими направлениями:

а) пирометрия – измерение температуры самосветящихся объектов: пламени, плазмы, астрофизических объектов;

б) радиометрия – измерение температуры по собственному тепловому излучению тел. Для невысоких и комнатных температур это излучение находится в инфракрасном диапазоне длин волн;

в) тепловидение – радиометрическое измерение температуры с пространственным разрешением и с преобразованием температурного поля в телевизионное изображение, иногда с цветовым контрастом. Позволяет измерять градиенты температуры, температуру среды в замкнутых объемах, например, температуру жидкостей в резервуарах и трубах [4; 5].

### 2.1.3. Термометры расширения

#### *Жидкостные термометры*

Действие стеклянных жидкостных термометров основано на различии коэффициентов теплового расширения термометрического вещества и оболочки, в которой она находится (термометрического стекла или реже – кварца). Стеклянные жидкостные термометры отличаются высокой точностью, простотой устройства и дешевизной, однако они хрупки, непригодны для ремонта и не могут передавать показания на расстояние (за исключением электроконтактных ртутных термометров).

Основными элементами конструкции термометра (рис. 2.2) являются резервуар 1 с припаянным к нему капилляром 2, заполненные частично термометрической жидкостью 3, и шкала 4.

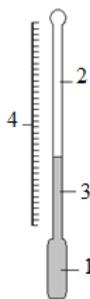


Рис. 2.2. Стеклянный жидкостный термометр:

*1 – резервуар; 2 – капилляр; 3 – термометрическая жидкость (ртуть, спирт, и т. п.); 4 – шкала.*

В качестве термометрической жидкости в большинстве случаев используется химически чистая ртуть. Ртуть не смачивает стекло, легко получается в чистом виде, находится в жидком состоянии в широком диапазоне температур (от  $-38,84$  до  $356,58^{\circ}\text{C}$ ). Кроме нее используются: толуол, этиловый спирт, керосин, петролейный эфир, пентан.

Конструктивно различают палочные термометры и термометры с вложенной шкалой. У палочных термометров шкала наносится на поверхность толстостенного капилляра. У термометров с вло-

женной шкалой капилляр и шкальная пластинка с нанесенной шкалой заключены в защитную оболочку, припаянную к резервуару (рис. 2.3а).

Показания стеклянного термометра зависят не только от температуры резервуара, но и от температуры столбика жидкости в капилляре, поэтому лабораторные приборы градуируются при полном погружении термометра в измеряемую среду до отсчитываемой температурной отметки. Если глубина их погружения не соответствует условиям градуировки, то в показания следует вносить поправку:

$$\Delta t = n\gamma (t - t_{BC}), \quad (2.4)$$

где  $n$  – число градусов в выступающем столбике;  $\gamma$  – температурный коэффициент расширения термометрической жидкости в стекле  $K^{-1}$ ;  $t$  – температура, показываемая термометром,  $^{\circ}C$ ;  $t_{BC}$  – средняя температура выступающего столбика, измеренная вспомогательным термометром,  $^{\circ}C$ .

Технические термометры градуируются при частичном погружении на определенную глубину и при определенной температуре выступающего столбика.

Выпускаются термометры для измерения температур от  $-100^{\circ}$  до  $600^{\circ}C$ . Для защиты от механических повреждений термометры помещают в защитную арматуру.

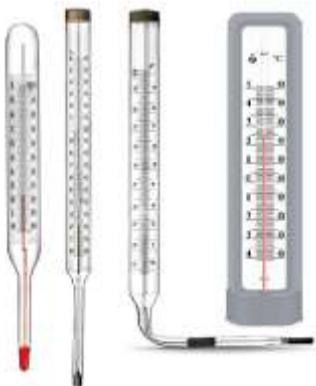


Рис. 2.3. Основные разновидности жидкостных стеклянных термометров

Выпускаются также ртутные электроконтактные термометры (рис. 2.4), предназначенные для сигнализации или поддержания определенной температуры (с заданным постоянным контактом или с подвижным контактом). Электроконтактный жидкостный термометр включает в себя резервуар со ртутью, подвижный контакт, шкалу, вращающуюся головку с магнитами и винтовую пару. Ртуть, расширяясь, касается поверхностью контактного проводника, положение которого фиксируется специальным устройством (рис. 2.4а).

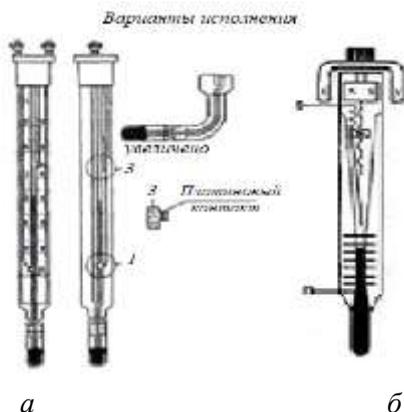


Рис. 2.4. Ртутные электроконтактные термометры

Положение проводника можно изменять вращением магнита, расположенного снаружи корпуса термометра (рис. 2.4б).

У лабораторных и других термометров, градуируемых и предназначенных для измерения при погружении в измеряемую среду до отсчитываемого деления, могут возникать систематические погрешности за счет выступающего столбика термометра [5; 6]. Если капиллярная трубка будет погружена в измеряемую среду не полностью (рис. 2.5), то температура выступающей части капиллярной трубки  $t_{oc}$  будет отличаться от температуры измеряемой среды  $t$ , и в результате возникнет погрешность измерения.

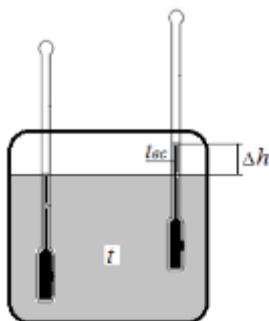


Рис. 2.5. Возможные случаи погружения термометра в измеряемую среду

Очевидно, что поправку на выступающий столбик в градусах можно легко внести в результаты показаний термометра.

### ***Механические контактные термометры (МКТ)***

Все конструктивные исполнения МКТ основаны на тепловом расширении веществ (твердых, жидких, газообразных). Это жидкостные и газовые, биметаллические, dilatометрические термометры.

### ***Дилатометрические термометры***

Дилатометрические термометры – средство измерения температуры, использующее преобразование ее изменения в разность удлинений двух твердых тел, обусловленную различием их температурных коэффициентов линейного расширения.

Принцип действия dilatометрических датчиков температуры поясняется схемой, приведенной на рис. 2.6.

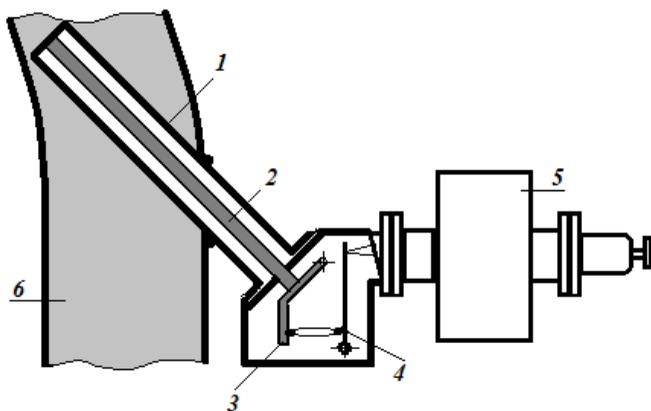
Чувствительный элемент (рис. 2.6а) выполнен из металлической оболочки 1 и кварцевого или фарфорового стержня 2. Рычаги 3 и 4 пропорционально увеличивают разность расширения оболочки и стержня и создают входной сигнал для гидравлического усилительного устройства 5 автоматического регулятора температуры в трубопроводе 6.

Изменение длины твердого тела от температуры может быть аппроксимировано линейной зависимостью:

$$l_k = l_n (1 + \alpha t), \quad (2.5)$$

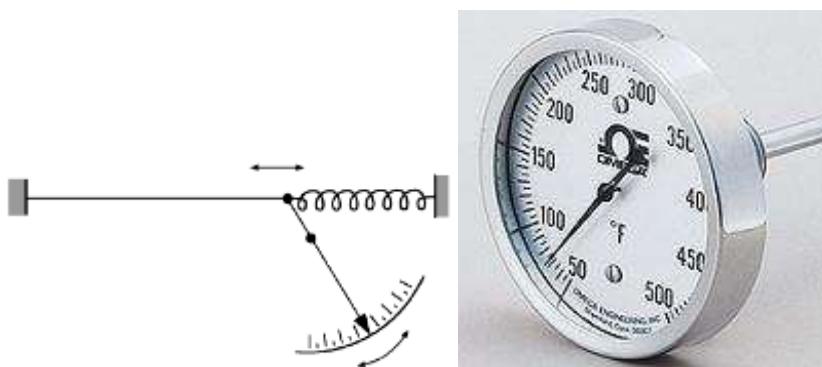
где  $\alpha$  – средний коэффициент линейного расширения в сравнительно небольшом температурном интервале;  $l_k, l_n$  – длины термометров при конечной и начальной температурах (рис. 2.6б).

Если в начале рабочего диапазона  $t_n$  длина обоих твердых тел одинакова и равна  $l_n$ , то возникающая в конце диапазона  $t_k$  разность удлинений тел  $\Delta l$  будет равна  $\Delta l = l_n (\alpha_1 - \alpha_2) (t_k - t_n)$ .  $\Delta l$  тем больше, чем больше  $(\alpha_1 - \alpha_2)$ . Диапазон измерения dilatометрических термометров от  $-30$  до  $1000^\circ\text{C}$ , погрешность 1,5-2,5 %.



а)

Рис. 2.6. Схемы dilatометрических устройств измерения температуры



б)

Рис. 2.6. Схемы dilatометрических устройств измерения температуры

Дилатометрические термометры обладают высокой надежностью и часто используются в релейных схемах.

### **Биметаллические термометры**

Разновидностью дилатометрических термометров являются датчики температуры с биметаллическими пластинами. Используя тот же принцип работы – тепловое расширение тел при нагревании – в биметаллических датчиках измеряется не удлинение, а изгиб пластины, состоящей из двух металлов с разными температурными коэффициентами расширения [6]. Схема такого датчика, получившего широкое применение в различных системах регулирования температуры, приведена на *рис. 2.7*.

При изменении температуры такой пластины она изгибается в сторону материала с меньшим коэффициентом линейного расширения (на рисунке – металл 2).

Для закрепленной с одного конца биметаллической пластины длиной  $l$  и толщиной  $s$  перемещение  $A$  ее ненагруженного конца при изменении температуры пластины от  $t_1$  до  $t_2$  определится выражением:

$$A = (\gamma \cdot l^2 / s) (t_2 - t_1), \quad (2.6)$$

где  $\gamma$  – удельный изгиб пластины, зависящий в основном от разности коэффициентов линейного расширения использованных металлов.

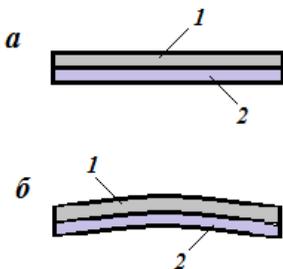


Рис. 2.7. Схема чувствительного элемента биметаллического термометра:

а – при нормальной температуре; б – при повышенной; 1 – латунь;

2 – инвар

Из (2.6) следует, что перемещение ненагруженного конца пластины не зависит от ее ширины. Зависимость перемещения незакрепленного конца биметаллической пластины от температуры справедлива в том интервале температур, в котором оба используемых металла обладают упругой деформацией.

Подбором специальных сплавов удастся создать биметаллический термометр с рабочим диапазоном температур от  $-100$  до  $600^{\circ}\text{C}$ . Для увеличения длины пластины при сохранении малых габаритов чувствительного элемента в некоторых случаях его выполняют в виде спирали [6].

В этом случае изменение температуры от  $t_1$  до  $t_2$  вызывает поворот ненагруженного конца спирали на угол  $\phi$ :

$$\phi = (360\gamma \cdot l^2 / \pi s) \cdot (t_2 - t_1). \quad (2.7)$$

Наибольшее распространение биметаллические термометры получили для работы при комнатной температуре – как для непосредственного ее измерения, так и для автоматического регулирования (в этом случае чувствительный элемент приводит в действие систему управления контактами реле). Варианты конструктивного исполнения биметаллических чувствительных элементов можно найти в работе [7].

Основная погрешность биметаллических термометров составляет 1-3 % диапазона измерения, *градуировочная характеристика* близка к линейной. Однако чувствительные элементы термометров не взаимозаменяемы, и приборы требуют индивидуальной градуировки. Она может осуществляться в термостатах путем сравнения с показаниями соответствующего образцового средства измерений. Однако биметаллические и дилатометрические термометры на практике применяют сравнительно редко.

#### 2.1.4. Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления рабочего вещества в замкнутом объеме (*термосистеме*) от температуры.

В зависимости от агрегатного состояния рабочего вещества в термосистеме *манометрические термометры* подразделяют на *газовые, жидкостные* и *конденсационные* (парожидкостные).

*Манометрические термометры* могут быть использованы для измерения температур от  $-150$  до  $600^{\circ}\text{C}$ . Диапазон измерения определяется наполнителем *термосистемы*. Термометры со специальными наполнителями (расплавленными металлами) пригодны для измерения температур от  $100$  до  $1000^{\circ}\text{C}$ .

*Термосистема* (рис. 2.8) состоит из *термобаллона 1*, капиллярной трубки *3* и манометрической части *2*. Вся система прибора (*термобаллон, капиллярная трубка, манометрическая пружина*) заполнена рабочим веществом.

*Термобаллон* погружается в объект измерения. При изменении температуры рабочего вещества в *термобаллоне* изменяется давление в замкнутой системе, которое через капиллярную трубку передается на манометрическую часть, представляющую собой манометр с трубчатой пружиной, являющийся измерительным прибором манометрического термометра.

*Термобаллон* представляет собой цилиндр, изготовленный из латуни или специальных сталей, стойких к химическому воздействию измеряемой среды. Геометрические размеры *термобаллона* зависят от типа термометров и от задач измерения. Диаметр *термобаллона* находится в пределах от  $5$  до  $30$  мм, а его длина  $60$ - $500$  мм.

Капилляр, соединяющий *термобаллон* с манометрической трубкой, представляет собой медную или стальную трубку с внутренним диаметром  $0,1$ - $0,5$  мм. Длина капилляра может быть до  $60$  м. Медные капилляры имеют стальную защитную оболочку, предохраняющую их от повреждения при монтаже и эксплуатации.



Рис. 2.8. Схема манометрического термометра

1 – термобаллон; 2 – манометрическая часть; 3 – капиллярная трубка

По устройству *манометрические термометры* всех типов аналогичны. В зависимости от конструкции измерительной системы они бывают *показывающими, самопишущими, безшкальными* со встроенными преобразователями для дистанционной передачи показаний.

*Манометрические термометры* – достаточно простые устройства, позволяющие осуществлять автоматическую регистрацию измерений и передачу показаний на расстояние. Выпускаются термометры с унифицированным пневматическим и электрическим сигналами. Достоинство этих термометров – возможность их использования на взрывоопасных объектах. К недостаткам относят необходимость частой поверки из-за возможной разгерметизации прибора и сложность ремонта, а также довольно большие размеры термобаллона.

*Манометрические термометры* подразделяют на три основные разновидности [8]:

1) *жидкостные*, в которых вся измерительная система (*термобаллон, манометр и соединительный капилляр*) заполнена жидкостью;

2) *конденсационные* (по старым терминологиям: паровые или парожидкостные), в которых *термобаллон* заполнен частично жидкостью с низкой температурой кипения и частично – ее насыщенными парами, а соединительный капилляр и манометр – насыщенными парами жидкости или, чаще, специальной передаточной жидкостью;

3) *газовые*, в которых вся измерительная система (*термобаллон, манометр и капилляр*) заполнена инертным газом.

Достоинствами *манометрических термометров* являются: сравнительная простота конструкции и применения, возможность дистанционного измерения температуры (передачи показаний на расстояние) и возможность автоматической записи показаний.

К недостаткам *манометрических термометров* относятся: относительно невысокая точность измерения (класс точности 1,6; 2,5 или 4,0 и реже 1,0); небольшое расстояние дистанционной передачи показаний (не более 60 м) и трудность ремонта при разгерметизации измерительной системы.

### ***Жидкостные манометрические термометры***

В *жидкостных манометрических термометрах* в качестве термометрического вещества чаще всего используют ртуть для измерений в интервале температур от  $-25$  до  $600^{\circ}\text{C}$  и реже - органические жидкости: метиловый спирт или ксилол  $\text{C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2$  для измерений в интервале температур от  $-80$  до  $320^{\circ}\text{C}$ . Измерительная система заполняется термометрическим веществом под большим начальным давлением (при температуре заполнения). Это необходимо для того, чтобы снизить возможные дополнительные погрешности за счет гидростатического давления жидкости.

В приборах этого типа всю систему термометра заполняют термометрической жидкостью под некоторым начальным давлением. В качестве термометрического вещества в данных термометрах используется ртуть под давлением 10-15 МПа при комнатной температуре или толуол, ксилол, пропиловый спирт, силиконовые жид-

кости при  $P=0,5-5$  МПа. При ртутном заполнении диапазон измерений  $-30-600^{\circ}C$ , а для органических жидкостей  $-150-300^{\circ}C$ . Так как жидкость практически несжимаема, объем термобаллона в жидкостных термометрах должен быть согласован со свойствами манометрической пружины.

При измерении температуры от  $t_0$  до  $t$  из *термобаллона* вытесняется жидкость объемом

$$\Delta V = V_0 (\beta_{жс} - 3\alpha) (t - t_0), \quad (2.8)$$

где  $\beta_{жс}$  – температурный коэффициент объемного расширения жидкости;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения материала термобаллона;  $V_0$  – объем жидкости в термобаллоне при температуре  $t_0$ .

Как следует из уравнения (2.8), изменение объема жидкости при нагревании является линейной функцией температуры, поэтому *жидкостные термометры*, как и *газовые*, имеют равномерную шкалу.

Благодаря большой теплопроводности жидкости *термобаллон* термометра сравнительно быстро принимает температуру измеряемой среды. Однако по этой же причине погрешности от колебания температуры окружающей среды у *жидкостных термометров* больше, чем у *газовых*. При значительной длине капилляра для *жидкостных термометров* применяют компенсационные устройства в виде биметаллического компенсатора [8].

Из-за значительного давления в системе, которое предохраняет жидкость от закипания, погрешность от изменения барометрического давления в этих термометрах отсутствует.

*Манометрическим жидкостным термометрам* свойственна гидростатическая погрешность, вызванная различным положением *манометра* относительно *термобаллона*. Эта погрешность устраняется после монтажа прибора путем смещения указателя прибора на нужное значение по шкале.

### ***Конденсационные или парожидкостные манометрические термометры***

В качестве манометрического вещества в этих термометрах используются легкокипящие жидкости (*пропан, этиловый эфир, ацетон, толуол, хлористый метил* и т. д.). Диапазон измерения –  $50\text{-}350^\circ\text{C}$ . Специально изготовленные термометры применяются для измерения сверхнизких температур от  $0,8^\circ\text{K}$ .

*Термобаллон* термометра заполнен конденсатом примерно на 70-75 % объема, а над конденсатом находится насыщенный пар этой же жидкости. *Капилляр* опущен в *термобаллон* так, что его конец находится в жидкости и в том случае, когда при максимальной температуре в *термобаллоне* остается часть жидкости.

Принцип работы *конденсационных термометров* основан на зависимости давления  $P$  насыщенного пара низкокипящих жидкостей от температуры:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\lambda}{T(V_{\text{п}} - V_{\text{ж}})}, \quad (2.9)$$

где  $\lambda$  – скрытая теплота испарения;  $V_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{ж}}$  – удельные объемы пара и жидкости.

Давление в термосистеме *конденсационного термометра* равно давлению насыщенного пара при температуре рабочей жидкости, которая в свою очередь равна температуре измеряемой среды.

Верхний предел применения для органических жидкостей обычно выбирают близким к давлению порядка  $20 \text{ бар}$ .

Зависимость  $P$  насыщенного пара от температуры однозначна (до критической температуры), но нелинейна, из-за чего шкалы конденсационных термометров имеют значительную неравномерность. Для получения равномерной шкалы конденсационные термометры снабжают специальным линеаризующим устройством.

Рабочее давление  $P$  зависит только от пределов измерения и закона изменения давления насыщенного пара от температуры. Таким образом, давление в термосистеме зависит только от измеряемой температуры  $t$ , изменение температуры окружающей среды не оказывает влияния на показание прибора.

Поскольку *термобаллон* может быть малого размера, то *конденсационные термометры* менее инерционны, чем другие *манометрические термометры*, и более чувствительны, т. к. давление насыщенного пара резко меняется с температурой.

У *конденсационных манометрических термометров* возможно появление дополнительных погрешностей: 1) *гидростатической* (из-за различной высоты расположения *термобаллона* и *манометра*) и 2) *атмосферной* (из-за колебания атмосферного давления - особенно для начала шкалы).

Первая компенсируется аналогично жидкостным термометром, а вторая значительна лишь на начальном участке шкалы, когда давление в термосистеме невелико.

В качестве передаточной жидкости, заполняющей капилляр и манометр жидкостных *конденсационных термометров*, чаще всего применяют *глицерин* (пропантриоль) в смеси со спиртом или водой.

В жидкостных *конденсационных манометрических термометрах* наибольшее распространение получили термометрические вещества, приведенные в *табл. 2.2*.

Таблица 2.2

## Термометрические вещества для конденсационных манометрических термометров

Наименование	Формула	Температура кипения при нормальном атмосферном давлении, °С	Критическая температура, °С	Критическое давление, бар	Пределы применения, °С	
					нижний	верхний
Хлор-метил	$\text{CH}_3\text{Cl}$	-23,7	+143,2	64,5	-25	+75
Хлор-этил	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$	+12,2	170,0	50,6	0	120
Ацетон	$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$	+56,1	235,0	46,1	+60	—
Бензол	$\text{C}_6\text{H}_6$	+79,6	288,5	46,8	+80	250
Ртуть	Hg	356,6	—	—	350	500

Погрешность за счет температуры окружающей среды теоретически отсутствует, так как изменение объема передаточной жидкости приводит лишь к изменению соотношения между жидкой и паровой фазой в *термобаллоне*, не меняя в нем давления, зависящего только от температуры. Однако практически небольшая погрешность при изменении температуры окружающей среды все же наблюдается (за счет манометра) и нормируется (ГОСТ 8624-64) значением до 0,25 % на каждые  $10^{\circ}\text{C}$  отклонения температуры от  $+20^{\circ}\text{C}$ .

Шкалы *конденсационных термометров* получаются существенно неравномерными из-за нелинейного соотношения между температурой кипения и соответствующим давлением (*рис. 2.9*).

Рабочая часть шкалы располагается в верхней ее половине. Длина соединительного капилляра может достигать 60 м.

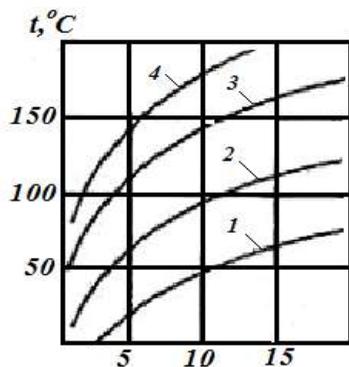


Рис. 2.9. Зависимости температуры кипения от давления:  
1 – хлор-метила; 2 – хлор-этила; 3 – ацетона и 4 – бензола

## Газовые манометрические термометры [9]

Предназначены для измерения температуры от  $-50$  до  $600^\circ\text{C}$ . Термометрическим веществом здесь служит гелий или азот. Принцип работы газовых манометрических термометров основан на использовании закона Шарля:

$$P_t = P_0 (1 + \beta (t - t_0)), \quad (2.10)$$

где  $t_0$  и  $t$  – начальная и конечная температуры;  $P_0$  и  $P_t$  – давления газа при температурах  $t_0$  и  $t$  соответственно;  $\beta$  – термический коэффициент давления газа ( $\beta = 1/273,15$  или  $0,00366\text{ K}^{-1}$ ).

Для реальных систем эта линейная связь строго не сохраняется, т. к. с изменением температуры изменяется объем *термобаллона* и с изменением давления – объем манометрической пружины, а также происходит *массообмен* между *термобаллоном* и *капилляром*. Но поскольку эти изменения невелики, то можно считать, что шкала *газовых манометрических термометров* равномерна.

Подставляя в формулу (2.10) вместо  $P_t$  и  $t$  соответственно  $P_n$  и  $t_n$ , а также  $P_k$  и  $t_k$ , получим выражение для величины рабочего давления *газового манометрического термометра*:

$$\Delta P = P_k - P_n = P_n \cdot \beta \cdot (t_k - t_n), \quad (2.11)$$

где  $P_n$  и  $P_k$  – давления в *термосистеме*, соответствующее начальному  $t_n$  и конечному  $t_k$  значениям температуры по шкале прибора.

По этой формуле может быть рассчитано начальное давление заполнения системы  $P_n$  для заданного диапазона измерения температур.  $P_n$  в зависимости от диапазона шкалы может быть в пределах от  $1$  до  $3\text{ МПа}$ . Чем больше  $P_n$ , тем больше  $\Delta P$  и тем меньше влияние барометрического давления на показания прибора.

Объем *термобаллона*  $V_T$  в газовых манометрических термометрах не зависит ни от рабочего давления, ни от пределов измерения температур. Но если при измерении температура, окружающая *капилляр* и *манометрическую пружину*, отличается от градуировочной температуры, то возникает дополнительная погрешность. Чтобы ее уменьшить, стремятся уменьшить отношение  $(V_n + V_k)/V_T$  (где  $V_n$  и  $V_k$  – внутренний объем *пружины* и *капилляра*), увеличивая размер *термобаллона*. Поэтому для *газовых манометрических*

*термометров* характерен большой размер *термобаллона* ( $d = 20-30$  мм,  $l = 250-500$  мм) и как следствие этого – их значительная инерционность.

В *газовых манометрических термометрах* в качестве термометрического вещества обычно используют *азот*. Область применения газовых термометров по ГОСТ 8624-64 лежит в интервале от  $-160$  до  $+600^{\circ}\text{C}$ .

Дополнительные погрешности *газовых манометрических термометров* связаны с колебаниями температуры окружающей среды, поскольку коэффициент теплового расширения газов много больше, чем у жидкостей, и равен приблизительно  $0,00365 \text{ град}^{-1}$ . Для уменьшения погрешностей приходится увеличивать размеры *термобаллона* и уменьшать сечение *капилляра*. Чем больше длина *капилляра*, тем больше получаются размеры *термобаллона*. При длине *капилляра*  $60$  м *термобаллоны* *газовых термометров*, серийно изготавливаемых, имеют наружный диаметр  $22$  мм, а рабочую длину -  $435$  мм. Такие размеры *термобаллона* могут создать трудности при установке их в объекты измерения. По ГОСТ 8624-64 допустимая дополнительная приведенная погрешность *газовых термометров* при отклонении температуры окружающей среды на  $10^{\circ}\text{C}$  не должна превышать  $0,5\%$ .

*Манометрические термометры* не имеют большого применения на тепловых электрических станциях. В промышленной теплоэнергетике они встречаются чаще, особенно в случаях, когда по условиям взрыво- или пожаробезопасности нельзя использовать электрические методы дистанционного измерения температуры.

Проверка показаний манометрических термометров производится теми же методами и средствами, что и стеклянных жидкостных.

## 2.1.5. Термоэлектрические термометры

### *Основные понятия и определения*

Измерение температуры *термоэлектрическими термометрами* (*термоэлектрическими преобразователями - ТЭП*) основано на использовании открытого в 1821 году немецким физиком Т. Зеебеком *термоэлектрического эффекта*, заключающегося в генерировании *термоэлектродвижущей силы (термо-ЭДС)*, возникающей из-за разности температур между двумя соединениями различных металлов или сплавов, образующих часть одной и той же цепи [10; 11].

В простейшем случае, если цепь состоит из 2-х разнородных материалов, она носит название *термопары*.

Под *термоэлектрическим термометром* принято понимать комплект, состоящий из:

- 1) *термопары*, осуществляющей преобразование температуры в электрическое напряжение;
- 2) *линий связи* (удлиняющих проводов);
- 3) вторичного прибора для измерения *термо-ЭДС*.

### *Принцип действия*

*Термопара* представляет собой цепь, состоящую из двух соединенных между собой разнородных проводников *A* и *B* (*рис. 1.9*).

Эти проводники называются *термоэлектродами*, места соединения *термоэлектродов – спаями*.

*Спай* с температурой  $t$ , погружаемый в измеряемую среду, называется *рабочим (измерительным) спаем термопары*, второй *спай* с температурой  $t_0$  носит название *свободного (соединительного)*.

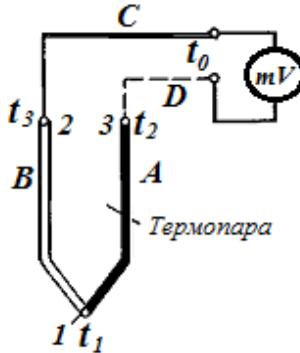


Рис. 2.10. Схема контура термопары

Зеебеком было установлено, что если температуры  $t_0$  и  $t_1$  не равны, то в такой цепи  $AB$  будет протекать электрический ток  $I_t$ . Направление тока зависит от разности температур  $t_1$  спаев. При замыкании такой цепи на концах может быть измерена *термо-ЭДС*. Этот эффект обладает и обратным действием, т. е. если через такую цепь пропустить электрический ток, то в зависимости от направления тока один из спаев будет нагреваться, а другой охлаждаться (*эффект Пельтье*). Если соединить два провода из разнородных металлов, то между их концами возникнет электродвижущая сила величиной порядка милливольт, с температурным коэффициентом около  $50 \text{ мкВ}$  на градус. Такие соединения называются *термопарами* и используются для измерения температуры в диапазоне от  $-270$  до  $+2500$  градусов Цельсия.

Зависимость напряжения от температуры нелинейна, однако в небольшом диапазоне температур *термо-э.д.с.* пропорциональна разности температур спаев  $T_1$  и  $T_2$ :

$$\text{ЭДС} = S(T_2 - T_1), \quad (2.12)$$

где  $S$  – коэффициент Зеебека.

Возникновение *термотоков* объясняется следующим: при соединении одинаково нагретых концов двух проводников из разнородных материалов, из которых в первом количестве свободных

электронов в единице объема больше, чем во втором, последние будут диффундировать из первого проводника во второй в большем числе, чем обратно.

Таким образом, первый проводник станет заряжаться положительно, а второй – отрицательно. Образующееся при этом в месте соединения проводников электрическое поле будет противодействовать этой диффузии, в результате чего наступит состояние подвижного равновесия, при котором между свободными концами указанных проводников появится некоторая разность потенциалов (*термо-ЭДС*). С увеличением температуры проводников значение этой *термо-ЭДС* также увеличивается.

Два фактора – *контактная разность потенциалов* и *диффузия электронов* – являются слагаемыми результирующей *термо-ЭДС* цепи, значение которой зависит от природы *термоэлектродов* и разности температур спаев. Кроме того, *термо-ЭДС* возникает и между концами однородного проводника, имеющими разные температуры. В этом случае до наступления состояния подвижного равновесия положительно заряжается более нагретый конец проводника как обладающий большей концентрацией свободных электронов по сравнению с концом, менее нагретым. Возрастание разности температур между концами проводника приводит к увеличению возникающей в нем *термо-ЭДС*.

При подключении внешней электрической цепи к *термопаре* появляются новые контакты разнородных металлов, которые вводят в измерительную цепь дополнительные ЭДС *BC* и *AD*. Однако можно видеть (*рис. 2.11*), что, например, *термо-ЭДС* двух контактов *медь-константан* включены встречно и поэтому компенсируют друг друга.

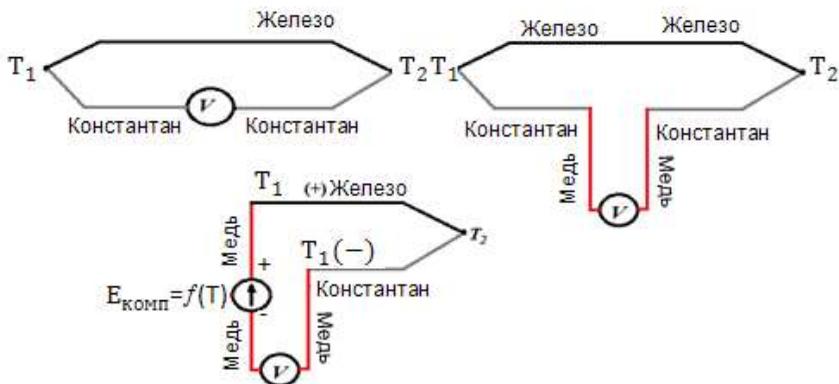


Рис. 2.11. Подключение вольтметра с помощью третьего металла

Это позволяет использовать *термопару* на большом удалении от измерителя напряжения, соединив их обычными медными проводами. Если по теореме об эквивалентном генераторе электрической цепи левый (по схеме) спай заменить источником напряжения, а затем перенести этот источник к вольтметру, то получим окончательно измерительную цепь, которая используется в большинстве приборов для измерения температуры на основе *термопар* (рис. 2.11).

Если температуры *спаев* различаются, и температура одного из *спаев* известна (например, измерена с помощью *термометра* или *терморезистора*), то температуру второго *спая* (т. е. измеряемую температуру) можно найти из уравнения (2.12)\*.

*\*Для ряда стандартных термопар эти коэффициенты установлены стандартом NIST (National Institute of Standards and Technology), опубликованы в монографии [Temperature-Electromotive Force Reference Functions and Tables for the Letter-Designated Thermocouple Types Based on the ITS-90. Natl. Inst. Stand. Technol. Monograph 175; 1993. 630 p.*

Для того чтобы упростить процесс измерения температуры с помощью термопары, температуру холодного спая можно стабилизировать, например, опустив холодный спай в ванночку со льдом.

Однако применение компьютера совместно с системой сбора данных делает эту процедуру излишней, поскольку температура холодного спая изменяется в небольших пределах, и поэтому применение даже недорогого терморезисторного датчика позволяет получить хорошие результаты с помощью программной компенсации температуры холодного спая.

Для обратного перехода от температуры к напряжению используют аналогичную полиномиальную аппроксимацию [10], коэффициенты которой приведены в таблице 2.3. Этой таблицей пользуются для точной компенсации температуры холодного спая.

### ***Конструкции термопар***

Сварка проводов, изготовленных из разных металлов, выполняется таким образом, чтобы получилось небольшое по размеру соединение - спай. Провода можно просто скрутить, однако такое соединение ненадежно и имеет большой уровень шумов. Сварку металлов иногда заменяют пайкой, однако верхний температурный диапазон такой термопары ограничен температурой плавления припоя.

В *таблице 2.4* приведены типы термопар и их маркировка в соответствии со стандартом ANSI.

При температурах, близких к температуре плавления припоя, контакт разнородных металлов в термопаре может нарушаться. Термопары, изготовленные сваркой, выдерживают более высокие температуры, однако химический состав термопары и структура металла в месте сварки могут нарушаться, что приводит к разбросу температурных коэффициентов термопар. Под действием высоких температур может произойти раскалибровка термопары вследствие изменения диффузии компонентов металла в месте сварки. В таких случаях термопару следует откалибровать заново или заменить.

Таблица 2.3

	Тип термометры									
	Е	Ж	К	Р	С	Т				
Коэффициент	0° ... 1,000°С	-210° ... 760°С	0° ... 1372°С	-50° ... 1,064°С	-50° ... 1,064°С	0° ... 400°С				
с0	0.0	0.0	-17.600413686	0.0	0.0	0.0				
с1	58.665508710	50.38118782	38.921204975	5.28961729765	5.40313308631	38.748106364				
с2	4.503227558E-2	3.047583693E-2	1.85587700E-2	1.3916658978E-2	1.2593428974E-2	3.32922279E-2				
с3	2.890840721E-5	-8.56810657E-5	-9.9457593E-5	-2.388556930E-5	-2.324779687E-5	2.06182434E-4				
с4	-3.30568967E-7	1.322819530E-7	3.18409457E-7	3.5691600106E-8	3.2202882304E-8	-2.18822568E-6				
с5	6.50244033E-10	-1.7052958E-10	-5.607284E-10	-4.62347666E-11	-3.314651964E-11	1.09968809E-8				
с6	-1.9197496E-13	2.09480907E-13	5.6075059E-13	5.007774410E-14	2.557442518E-14	-3.0815759E-11				
с7	-1.2536600E-15	-1.2538395E-16	-3.202072E-16	-3.73105886E-17	-1.25068871E-17	4.54791353E-14				
с8	2.14892176E-18	1.56317257E-20	9.7151147E-20	1.577164824E-20	2.714431761E-21	-2.7512902E-17				
с9	-1.4388042E-21	-	-1.210472E-23	-2.81038625E-24	-	-				
с10	3.59608995E-25	-	См. примечание	-	-	-				

Таблица 2.4

## Типы термопар и их маркировка

Обозн. ANSI	Тип по ГОСТ	Материал положитель. электрода	Материал отрицат. электрода	Макс. погрешн.	Макс. Темп.	Темп. коэф. при 20°С	Выходн. напряж. при 100°С
J	.	Железо, Fe	Констант., Cu-Ni	2,2°С или 0,35 %	760	51,45	5,268
K	ТХА	Хромель, CrNi	Алюмель, Ni-Al	2,2°С или 0,35 % выше 0°С 2,2°С или 2 % ниже 0°С	1370	40,28	4,095
T	.	Медь, Cu	Констант., Cu-Ni	1°С или 0,35 % выше 0°С 1°С или 1,5 % ниже 0°С	400	40,28	4,277
E	.	Хромель, CrNi	Констант., Cu-Ni	1,3°С или 0,5 % выше 0°С 1,3°С или 1 % ниже 0°С	1000	60,48	6,317

N	.	Нихромк, Ni-Cr-Si	Нисил, Ni-Si-Mg	2,2° С или 0,35 % выше 0° С 2,2° С или 2 % ниже 0° С	.	.	.
R	.	Платина-родий (13% Rh)	Платина, Pt	1,5° С или 0,25 %	1750	5,8	0,647
S	ТПП	Платина-родий (10% Rh)	Платина, Pt	1,5° С или 0,25 %	1750	5,88	0,645
B	ТПР	Платина-родий (30% Rh)	Платина- Родий, (6% Rh)	0,5° С выше +800° С	1800	.	0,033
L	ТХК	Хромель-Копель			900		
C	ТВР	Вольфрам-Рений, W-Re (5 % Rt)	Вольфрам- Рений, W-Re (26 % Rt)	4,5° С до - 425° С, 1 % до 2320° С	.	.	.

Промышленностью выпускаются термопары трех различных конструкций: с открытым спаем, с изолированным незаземленным спаем и с заземленным спаем. Термопары с открытым контактом имеют малую постоянную времени, но плохую коррозионную стойкость. Термопары двух других типов применимы для измерения температуры в агрессивных средах.

Особенностью термопар по сравнению с другими типами термодатчиков является то, что температурный коэффициент зависит только от материала, из которого изготовлена термопара, и не зависит от ее конструкции (термопары выполняются в форме щупа, прокладки, бронированного зонда и т. п.). Это делает термопары взаимно заменимыми без дополнительной подстройки. Вместе с тем погрешность измерения с помощью термопары возрастает при попадании жидкости внутрь термопары, вследствие чего возникает гальванический эффект. Кроме того, при высоких температурах сопротивление материала изоляции термопары уменьшается, и токи утечки через изоляцию вносят дополнительную погрешность в результат измерения.

### ***Измерительная цепь***

Основная проблема построения измерительной схемы на базе термопары связана с ее низким выходным напряжением (около  $50 \text{ мкВ}$  на градус), поскольку наведенные радиопомехи промышленной частоты  $50 \text{ Гц}$  на элементах измерительной цепи могут превышать это значение. Поэтому очень важно хорошо экранировать провода, идущие от термопары к системе сбора данных. Термопара должна быть подключена витой парой проводов, помещенных в общий экран. Однако наилучшие результаты получаются, если предварительно усилить сигнал термопары и уже усиленный сигнал передавать на большое расстояние. При этом электромагнитные наводки становятся малы по сравнению с усиленным сигналом от термопары, что увеличивает достоверность получаемых результатов. Поэтому усиление должно

быть выбрано таким, чтобы верхний предел измерения температуры был равен верхнему пределу выходного напряжения усилителя, то есть  $10\text{ В}$ .

### 2.1.6. Термопреобразователи сопротивления [12,13,14]

#### *Принцип действия*

Принцип действия *термопреобразователя* сопротивления основан на свойстве металлов и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление в зависимости от температуры. Величину, характеризующую изменение электросопротивления материалов в зависимости от температуры, называют температурным коэффициентом сопротивления (*ТКС*) и обозначают  $\alpha$ . Если  $R_t$  – электрическое сопротивление при некоторой температуре  $t$ , а  $R_0$  – электрическое сопротивление при  $0^\circ\text{C}$ , то температурный коэффициент сопротивления можно определить по формуле:

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 \cdot \Delta t}, \text{ град}^{-1}. \quad (2.13)$$

Металлы, имеющие положительный *ТКС* (для большинства чистых металлов  $\alpha = 0,004\text{--}0,006 \text{ град}^{-1}$ ), должны иметь свойства, незначительно отличающиеся от партии к партии, не должны окисляться и менять свои физические характеристики.

Желательно, чтобы *ТКС* был значительным, а зависимость сопротивления от температуры близка к линейной. К материалам, отвечающим этим условиям, относятся следующие металлы: платина, медь, никель и железо. Наибольшее практическое применение нашли платина и медь.

Платиновую проволоку применяют в образцовых и технических *термопреобразователях* сопротивления. Диапазон температур, при которых работают платиновые *термопреобразователи* сопротивления, составляет  $-260\text{--}+1100^\circ\text{C}$ . К недостаткам платины относится отклонение температурной зависимости сопротивления от линейного закона.

Медь применяется в *термопреобразователях* сопротивления, измеряющих температуру от  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ , и имеет высокий *ТКС* ( $0,0043-0,0027 \text{ град}^{-1}$ ). Производство меди высокой чистоты не представляет затруднения. Сопротивление меди линейно зависит от температуры. Материал легко окисляется при нагревании, что обуславливает невысокий верхний предел измерения [12].

В зависимости от назначения *термопреобразователи* сопротивления (*ТС*) бывают эталонные (платиновые), образцовые (платиновые) и рабочие. К рабочим *ТС* относятся лабораторные (преимущественно платиновые) и технические (платиновые и медные).

При эксплуатации технических *ТС* важна их взаимозаменяемость, основным условием которой является равенство сопротивлений всех *термопреобразователей* при определенной температуре в пределах установленных допусков. Взаимозаменяемость достигается стандартной градуировкой, при которой все термометры одной градуировки имеют одинаковые сопротивления при  $0^{\circ}\text{C}$  и равные значения *ТКС*.

### **Типы термопреобразователей сопротивления**

Промышленные *термопреобразователи* сопротивления в РФ выпускаются в соответствии с ГОСТ 6651-94 трех типов: *платиновые, медные и никелевые термометры* сопротивления (таблица 2.5).

Таблица 2.5

#### **Типы термопреобразователей**

Тип ТС	Условное обозначение номинальной статической характеристики (НСХ)	Диапазон измеряемых температур
Платиновый (ТСП)	1П 10П 50П 100П 500П	$-260^{\circ}\text{C}$ , $+850^{\circ}\text{C}$
Медный (ТСМ)	10М 50М 100М	$-200^{\circ}\text{C}$ , $+200^{\circ}\text{C}$
Никелевые (ТСН)	100Н	$-60^{\circ}\text{C}$ , $+180^{\circ}\text{C}$

Номинальное значение сопротивления при  $0^{\circ}\text{C}$ , условное обозначение номинальной статической характеристики и диапазон измеряемых температур приведены в *таблице 2.5*. К недостаткам *никелевых, медных, как и платиновых термопреобразователей*, является отклонение температурной зависимости сопротивления от линейного закона.

В *таблицах 2.6 и 2.7* приведены данные для градуировки сопротивления *платиновых, медных и никелевых термопреобразователей*, а в *таблицах 2.8 и 2.9* - градуировочные характеристики *хромель-алюмелевых и хромель-константановых преобразователей (гр. ХА и ХК)*.

Таблица 2.6

**Градуировочные таблицы сопротивления платиновых термопреобразователей**

Температура термометра, $^{\circ}\text{C}$	Сопротивление термопреобразователя, Ом						
	1П	5П	10П	50П	100П	500П	гр.21
-150	0,3878	1,9390	3,878	19,390	38,78	193,90	17,847
-100	0,5964	2,9820	5,964	29,820	59,64	298,20	27,440
-90	0,6374	3,1870	6,374	31,870	63,74	318,70	29,330
-80	0,6783	3,3915	6,783	33,915	67,83	339,15	31,210
-70	0,7190	3,5950	7,190	35,950	71,90	359,50	33,080
-60	0,7596	3,7980	7,596	37,980	75,96	379,80	34,940
-50	0,8000	4,0000	8,000	40,000	80,00	400,00	36,800
-40	0,8403	4,2015	8,403	42,015	84,03	420,15	38,650
-30	0,8804	4,4020	8,804	44,020	88,04	440,20	40,500
-20	0,9204	4,6020	9,204	46,020	92,04	460,20	42,340
-10	0,9602	4,8010	9,602	48,010	96,02	480,10	44,170
0	1,0000	5,0000	10,000	50,000	100,00	500,00	46,000
10	1,0396	5,1980	10,396	51,980	103,96	519,80	47,824
20	1,0792	5,3960	10,792	53,960	107,92	539,60	49,643
30	1,1186	5,5930	11,186	55,930	111,86	559,30	51,450

Продолжение таблицы

40	1,1578	5,7890	11,578	57,890	115,78	578,90	53,264
50	1,1970	5,9850	11,970	59,850	119,70	598,50	55,060
60	1,2361	6,1805	12,361	61,805	123,61	618,05	56,862
70	1,2750	6,3750	12,750	63,750	127,50	637,50	58,653
80	1,3138	6,5690	13,138	65,690	131,38	656,90	60,438
90	1,3525	6,7625	13,525	67,625	135,25	676,25	62,210
100	1,3911	6,9555	13,911	69,555	139,11	695,55	63,992
110	1,4296	7,1480	14,296	71,480	142,96	714,80	65,761
120	1,4679	7,3395	14,679	73,395	146,79	733,95	67,524
130	1,5061	7,5305	15,061	75,305	150,61	753,05	69,282
140	1,5443	7,7215	15,443	77,215	154,43	772,15	71,030
150	1,5823	7,9115	15,823	79,115	158,23	791,15	72,782
160	1,6202	8,1010	16,202	81,010	162,02	810,10	74,523
170	1,6579	8,2895	16,579	82,895	165,79	828,95	76,259
180	1,6956	8,4780	16,956	84,780	169,56	847,80	77,990
190	1,7331	8,6655	17,331	86,655	173,31	866,55	79,715
200	1,7705	8,8525	17,705	88,525	177,05	885,25	81,435
210	1,8078	9,0390	18,078	90,390	180,78	903,90	83,150
220	1,8450	9,2250	18,450	92,250	184,50	922,50	84,859
230	1,8821	9,4105	18,821	94,105	188,21	941,05	86,562
240	1,9190	9,5950	19,190	95,950	191,90	959,50	88,262
250	1,9559	9,7795	19,559	97,795	195,59	977,95	89,960
260	1,9928	9,9640	19,928	99,640	199,28	996,40	91,642
270	2,0292	10,1460	20,292	101,460	202,92	1014,60	93,330
280	2,0657	10,3285	20,657	103,285	206,57	1032,85	95,001
290	2,1021	10,5105	21,021	105,105	210,21	1051,05	96,680
300	2,1383	10,6915	21,383	106,915	213,83	1069,15	98,338

Продолжение таблицы

350	2,3178	11,5890	23,178	115,890	231,78	1158,90	106,600
400	2,4944	12,4720	24,944	124,720	249,44	1247,20	114,720
450	2,6681	13,3405	26,681	133,405	266,81	1334,05	122,700
500	2,8389	14,1945	28,389	141,945	283,89	1419,45	130,550
550	3,0067	15,0335	30,067	150,335	300,67	1503,35	138,270
600	3,1717	15,8585	31,717	158,585	317,17	1585,85	145,850
650	3,3323	16,6615	33,323	166,615	333,23	1666,15	153,300
700	3,4912	17,4560	34,912	174,560	349,12	1745,60	160,508
750	3,6472	18,2360	36,472	182,360	364,72	1823,60	167,656
800	3,8002	19,0010	38,002	190,010	380,02	1900,10	174,671

Таблица 2.7

**Градуировочные таблицы сопротивления  
медных и никелевых термопреобразователей**

Температура термометра, °C	Сопротивление термопреобразова- теля ТСМ, Ом				Сопротивление термо- преобразователя ТСН, Ом	
	<i>100M</i>	<i>50M</i>	<i>10M</i>	<i>зр. 23</i>	<i>100H</i>	<i>50H</i>
-200	12,170	6,085	1,217			
-150	34,210	17,105	3,421	-	-	-
-100	56,530	28,265	5,653	-	-	-
-50	78,450	39,225	7,845	41,710	74,210	37,105
-40	82,780	41,390	8,278	43,970	79,100	39,550
-30	87,100	43,550	8,710	46,230	84,120	42,060
-20	91,410	45,705	9,141	48,480	89,280	44,640
-10	95,710	47,855	9,571	50,740	94,570	47,285
0	100,000	50,000	10,000	53,000	100,000	50,000
5	102,140	51,070	10,214	54,130	102,770	51,385
10	104,280	52,140	10,428	55,260	105,560	52,780
15	106,420	53,210	10,642	56,390	108,400	54,200
20	108,560	54,280	10,856	57,520	111,260	55,630
25	110,690	55,345	11,069	58,650	114,160	57,080
30	112,830	56,415	11,283	59,770	117,100	58,550

Продолжение таблицы

35	114,970	57,485	11,497	60,900	120,060	60,030
40	117,110	58,555	11,711	62,030	123,070	61,535
45	119,250	59,625	11,925	63,160	126,100	63,050
50	121,390	60,695	12,139	64,290	129,170	64,585
55	123,530	61,765	12,353	65,420	132,270	66,135
60	125,670	62,835	12,567	66,550	135,410	67,705
65	127,800	63,900	12,780	67,680	138,580	69,290
70	129,940	64,970	12,994	68,810	141,780	70,890
75	132,080	66,040	13,208	69,930	145,020	72,510
80	134,220	67,110	13,422	71,060	148,290	74,145
85	136,360	68,180	13,636	72,190	151,600	75,800
90	138,500	69,250	13,850	73,320	154,940	77,470
95	140,640	70,320	14,064	74,450	158,310	79,155
100	142,780	71,390	14,278	75,580	161,720	80,860
105	144,910	72,455	14,491	76,710	165,210	82,605
110	147,050	73,525	14,705	77, 840	168,750	84,375
115	149,190	74,595	14,919	78,970	172,320	86,160
120	151,330	75,665	15,133	80,090	175,950	87,975
125	153,470	76,735	15,347	81,320	179,620	89,810
130	155,610	77,805	15,561	82,350	183,340	91,670
135	157,750	78,875	15,775	83,480	187,100	93,550
140	159,890	79,945	15,989	84,610	190,910	95,455
145	162,020	81,010	16,202	85,740	194,770	97,385
150	164,160	82,080	16,416	86,870	198,680	99,340
155	166,300	83,150	16,630	88,000	202,640	101,320
160	168,440	84,220	16,844	89,130	206,650	103,325
165	170,580	85,290	17,058	90,250	210,710	105,355
170	172,720	86,360	17,272	91,380	214,820	107,410
175	174,860	87,430	17,486	92,510	218,990	109,495
180	177,000	88,500	17,700	93,640	223,210	111,605
185	179,130	89,565	17,913	-	-	-
190	181,270	90,635	18,127	-	-	-
195	183,410	91,705	18,341	-	-	-
200	185,550	92,775	18,555			

Таблица 2.8

**Градуировочная характеристика преобразователей гр. ХА  
(свободные концы при 0° С)**

Т <sub>раб.</sub> , °С	Термо-ЭДС преобразователя, мВ									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0	0,40	0,80	1,20	1,61	2,02	2,43	2,85	3,26	3,68
100	4,10	4,51	4,92	5,33	5,73	6,13	6,53	6,93	7,33	7,73
200	8,13	8,53	8,93	9,34	9,74	10,15	10,56	10,97	11,38	11,80
300	12,21	12,62	13,04	13,45	13,87	14,30	14,72	15,14	15,56	15,99
400	16,40	16,83	17,25	17,67	18,09	18,51	18,94	19,37	19,79	20,22
500	20,65	21,08	21,50	21,93	22,35	22,78	23,21	23,63	24,06	24,49
600	24,91	25,33	25,76	26,19	26,61	27,04	27,46	27,88	28,30	28,73
700	29,15	29,57	29,99	30,41	30,83	31,24	31,66	32,08	32,49	32,90
800	33,32	33,72	34,13	34,55	34,95	35,36	35,76	36,17	36,57	36,97
900	37,37	37,77	38,17	38,57	38,97	39,36	39,76	40,15	40,54	40,93
1000	41,32	41,71	42,09	42,48	42,88	43,26	43,64	44,02	44,40	44,78
1100	45,16	45,54	45,91	46,29	46,66	47,03	47,40	47,77	48,14	48,50
1200	48,87	49,23	49,59	49,95	50,31	50,67	51,02	51,38	51,73	52,08
1300	52,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Таблица 2.9

**Градуировочная характеристика преобразователей гр. ХК  
(свободные концы при 0° С)**

Т <sub>раб.</sub> , °С	Термо-ЭДС преобразователя, мВ									
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0	0,65	1,31	1,98	2,66	3,55	4,05	4,76	5,48	6,21
100	6,95	7,69	8,43	9,18	9,93	10,69	11,46	12,24	13,03	13,84
200	14,66	15,48	16,30	17,12	17,95	18,77	19,60	20,43	21,25	22,08

Продолжение таблицы

300	22,91	23,75	24,60	25,45	26,31	27,16	28,02	28,89	29,76	30,62
400	31,49	32,35	33,22	34,08	34,95	35,82	36,68	37,55	38,42	39,29
500	40,16	41,02	41,91	42,79	43,68	44,56	45,45	46,34	47,23	48,12
600	49,02	49,90	50,78	51,66	52,53	53,41	54,28	55,15	56,03	56,90
700	57,77	58,64	59,51	60,37	61,24	62,11	62,97	63,83	64,70	65,56
800	66,42	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Линеаризация температурной зависимости**

Температурная зависимость напряжения на выходе термопары является сильно нелинейной. Поэтому для нахождения температуры по измеренному значению напряжения необходимо использовать таблицу или нелинейную функцию, аппроксимирующую табличные данные, которые приведены в *таблицах 2.3, 2.4, 2.5.*

Эти таблицы получены при условии, что холодный спай термопары находится при температуре 0°С.

Таким образом, алгоритм измерения температуры должен состоять из следующих шагов:

1. Измерение температуры холодного спая.
2. Преобразование этой температуры в эквивалентное напряжение на выводах холодного спая термопары, используя градуировочную таблицу термопары.
3. Преобразование полученного напряжения в температуру, используя градуировочные таблицы термопар [9; 10].

Для улучшения отношения сигнал/помеха при значительном удалении термодатчика от системы электронного сбора данных и линеаризации температурной зависимости используют фильтр нижних частот (*рис. 2.12.*) третьего порядка с полосой 5 Гц, типа *RL-8F3* из серии *RealLab!*, который позволяет существенно ослабить помеху частотой 50 Гц.

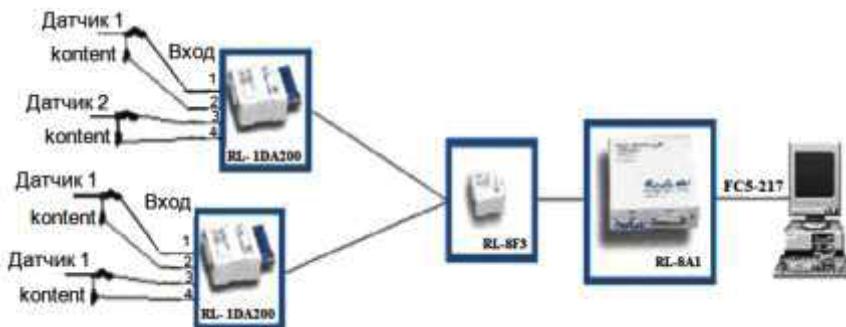


Рис. 2.12. Применение усилителей и фильтра

На частоте  $50 \text{ Гц}$  уровень помехи ослабляется на  $60 \text{ дБ}$ . Фильтр  $RL-8F3$  устанавливается перед системой ввода данных, т. е. перед мультиплексором. Поэтому инерционность фильтра не требует уменьшения скорости опроса температурных датчиков.

### **Конструкция термопреобразователей сопротивления**

Чувствительный элемент  $ТС$  из чистых металлов изготавливается путем специальной *безиндуктивной* намотки тонкой проволоки на каркас из изоляционного материала. Для предохранения от повреждений проволоку вместе с каркасом помещают в защитную оболочку (гильзу). От чувствительного элемента идут выводы к зажимам головки *термопреобразователя*, к которым подводятся провода, присоединяющиеся затем к измерительному прибору.

Кроме металлов для изготовления  $ТС$  применяются также полупроводниковые материалы: *германий, окислы меди, марганца, кобальта, магния, титана* и их смеси, такие  $ТС$  называются *терморезисторами*. Большинство полупроводниковых материалов обладают высоким отрицательным температурным коэффициентом сопротивления и также очень большим удельным сопротивлением. Поэтому можно изготавливать малые по размерам чувствительные элементы *термопреобразователей* сопротивления, обладающих значительным коэффициентом преобразования, что позволяет измерять температуры в малом объеме, с малой инерционностью и не учитывать сопротивление соединительных линий [14].

### **Вторичные приборы, работающие в комплекте с термопреобразователями сопротивления**

Зависимость сопротивления *полупроводникового терморезистора* от температуры может быть описана формулой:

$$R_t = R_c \exp\left(B \frac{T_0 - T}{T_0 T}\right), \quad (2.14)$$

где  $R_0$  – сопротивление *терморезистора* при температуре  $T_0$ , как правило,  $T_0=293^\circ \text{ K}$  ( $20^\circ \text{ C}$ );  $R_t$  – сопротивление при температуре  $T$ ;  $B$  – коэффициент, зависящий от материала проводника.

В связи с тем, что технология получения *терморезисторов* не позволяет изготавливать их с идентичными характеристиками, все *полупроводниковые термопреобразователи* сопротивления имеют индивидуальные характеристики, следовательно, не являются взаимозаменяемыми, но благодаря высокой чувствительности применяются в системах сигнализации.

При измерении температуры *термопреобразователем* сопротивления необходимо точно определить значение сопротивления, для чего используют мостовые схемы.

Уравновешенные мосты являются наиболее распространенными приборами для измерения сопротивлений. Поэтому они широко применяются и для работы в комплекте с *термопреобразователями* сопротивления (рис. 2.13) [18; 19].

В измерительной схеме ток от источника  $U_{\text{пит}}$  протекает по двум ветвям:  $acb$  и  $adb$ . Меняя значение  $R_2$ , можно добиться такого состояния, при котором разность потенциалов в точках  $c$  и  $d$ , а следовательно, и ток в диагонали моста  $c$  и  $d$ , равны нулю. Это состояние называется равновесием моста.

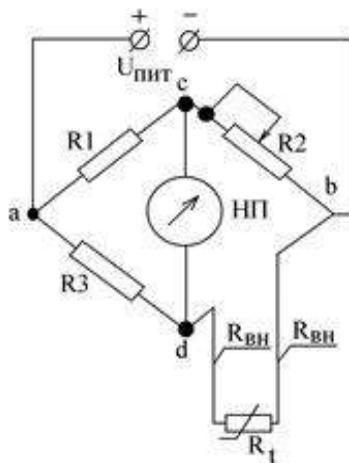


Рис. 2.13. Схема уравновешенного моста:  
сопротивления  $R_1, R_3$  постоянные;  $R_2$  – сопротивление реохорда  
(переменное);  $R_t$  – термопреобразователь сопротивления;  
НП – нуль-прибор

Мост считается уравновешенным, когда произведение сопротивлений противоположных плеч моста равны, т. е.  $R_1 R_t = R_2 R_3$ . При этом каждому значению  $R_t$  будет соответствовать определенное значение  $R_2$ .

Необходимо учитывать, что термопреобразователь сопротивления  $R_t$  часто находится на значительном расстоянии от измерительной схемы моста, и влияние сопротивлений внешних соединительных проводов  $R_{вн}$  может быть существенным за счет изменения температуры окружающей среды. Уравнение баланса при этом имеет вид:  $R_2 R_3 = (R_t + 2R_{вн}) R_1$ . Этот недостаток устраняется применением трехпроводной схемы соединения моста с термометром сопротивления (рис. 2.14) [18].

Такое изменение схемы приводит к тому, что сопротивление внешних проводов  $R_{вн}$  оказываются в разных плечах моста и, следовательно, в разных частях уравнения, поэтому их влияние на баланс компенсируется:  $R_3(R_2 + R_{вн}) = R_1(R_t + R_{вн})$ . При условии, что  $R_1 = R_3$ , зависимость между  $R_t$  и  $R_2$  становится однозначной:  $R_2 = R_t$ .

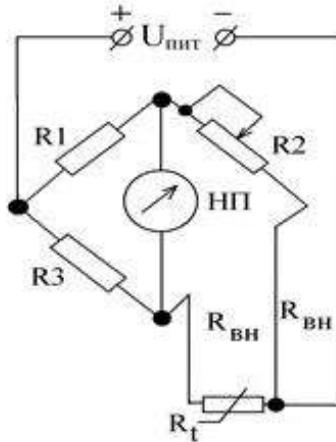


Рис. 2.14. Трехпроводная схема уравновешенного моста

Неуравновешенные мосты (рис. 2.15) обладают тем преимуществом, что не требуют уравнивания тока в их измерительной диагонали. Величина этого тока и является мерой измеряемого мостом сопротивления.

Возможность непосредственного отсчета температуры – еще одно преимущество неуравновешенного моста перед лабораторным уравновешенным мостом [19].

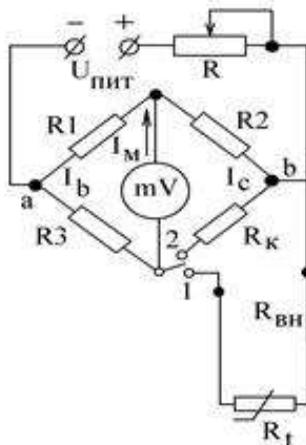


Рис. 2.15. Схема неуравновешенного моста

На принципиальной схеме неуравновешенного моста (рис. 2.15)  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  – постоянные сопротивления плеч моста;  $R$  – реостат;  $R_K$  – контрольное сопротивление;  $R_t$  – сопротивление термометра;  $I_M$  – сила тока, протекающего по рамке милливольтметра.

Необходимо учитывать, что такие схемы очень чувствительны к нестабильности напряжения питания ( $U_{ab}$ ), поэтому перед измерением его необходимо проконтролировать.

Для этого в схему моста параллельно термометру включается марганциновое контрольное сопротивление  $R_K$ , равное сопротивлению термометра при определенной температуре, отмеченной красной чертой на шкале милливольтметра.

Для контроля разности потенциалов  $U_{ab}$  переключатель ставят в положение 2 и с помощью реостата  $R$  устанавливают стрелку милливольтметра точно на красной черте. После этого переключатель ставят в положение 1 и по шкале снимают отсчет, соответствующий температуре термометра.

Применение стабилизированных источников питания исключает необходимость контроля. Эти мосты используются иногда в лабораторной практике, а также в измерительных схемах других приборов [20].

### **2.1.7. Бесконтактные методы измерения температуры**

Особое место среди способов измерения температуры занимают бесконтактные измерения, в частности, в производственном контроле ввиду их простоты, эффективности, точности и объективности получаемых результатов. Особенности реализации приборов для бесконтактных измерений позволяют применять их для измерения температуры практически для любых целей и в любых условиях, где это необходимо [21; 22; 23; 24].

## ***Бесконтактные измерения температуры с помощью пирометра***

Пирометр представляет собой специальный прибор, предназначенный для эффективного измерения бесконтактным способом температур различных тел. В специализированной литературе можно встретить еще одно название подобного прибора – инфракрасный термометр. Это связано с тем, что принцип работы устройства основан на получении инфракрасного излучения, поступающего от диагностируемого объекта, которое затем преобразуется в электрический сигнал.

*Пирометры* получили широкое распространение как в промышленном производстве и в некоторых областях технологического производства, так и в нашем повседневном быту. Уникальность подобных приборов заключается в том, что они позволяют измерять температуру тел в труднодоступных местах, на объектах, опасных для человеческого здоровья, а также температуру объектов, находящихся в движении. На сегодняшний день практически ни одна промышленная отрасль (сталелитейная, нефтеперерабатывающая) не обходится без применения *пирометров* [22].

Существует широкий спектр подобного оборудования, представленный как отечественными, так и западными производителями: яркостные, цветные и радиационные *пирометры*, низкотемпературные и высокотемпературные, которые используются в той или иной области.

На данном этапе уровень развития теоретической и практической физики позволяет получать результаты измерения какой-либо величины не прямым, а косвенным способом через обоснованные связи измеряемой физической величины с другими величинами, чье измерение не составляет труда. Так, например, чтобы получить численное значение ускорения движущегося тела, необходимо лишь зафиксировать начальную и конечную скорость, а также пройденный участок пути, не прибегая к помощи акселерометров (приборов для измерения ускорения). По аналогич-

ному принципу достаточно удобно измерять температуру. Измерение температуры совсем незатруднительно проводить оптическим способом: нагретые до какой-либо температуры тела объекты излучают волны соответствующей данной температуре длины волны (лямбда) в диапазоне длин волн, соответствующих инфракрасному диапазону частот (обратная зависимость длины волны).

В основе принципа действия бесконтактных термометров (инфракрасных термометров или же *пирометров*) как раз положен оптический метод измерения температуры [23].

## § 2.2. Измерение давления

### 2.2.1. Основные понятия

Давление является одним из важнейших физических параметров, и его измерение необходимо как в расчетных целях, например, для определения расхода, количества и тепловой энергии среды, так и в технологических целях, например, для контроля и прогнозирования безопасных и эффективных гидравлических режимов напорных трубопроводов, используемых на предприятии [25-29].

Давлением  $P$  называют отношение абсолютной величины нормального, то есть действующего перпендикулярно к поверхности тела вектора силы  $F$  к площади  $S$  этой поверхности. При равномерном распределении сил давление равно частному от деления нормальной составляющей силы давления на площадь, на которую эта сила действует.

На практике давления газообразных и жидких сред могут измеряться относительно двух различных уровней (*рис. 2.16*):

- уровня абсолютного вакуума, или абсолютного нуля давления – идеализированного состояния среды в замкнутом пространстве, из которого удалены все молекулы и атомы вещества среды;
- уровня атмосферного, или барометрического давления (ГОСТ 8.271-77).

## Виды измеряемых давлений

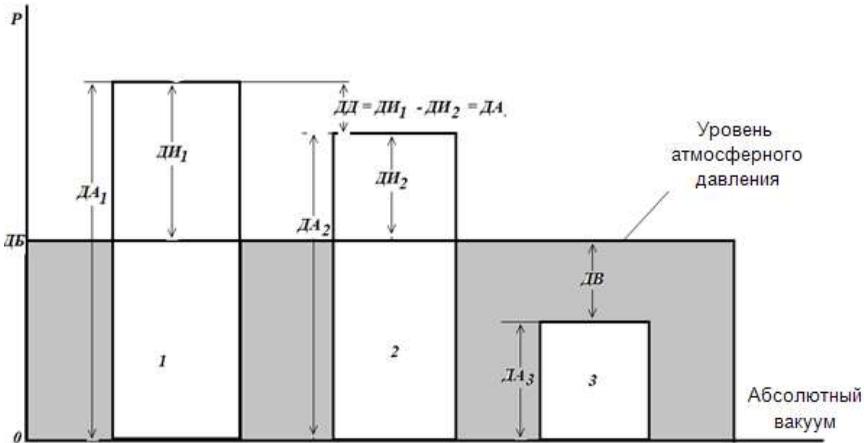


Рис. 2.16. Виды измеряемых давлений в точках 1, 2, 3 физического процесса:

ДБ – давление барометрическое; ДА – давление абсолютное; ДИ – давление избыточное; ДВ – давление вакуумметрическое;  
 ДД – давление дифференциальное

Давление, измеряемое относительно вакуума, называют давлением абсолютным ( $ДА$ ). Барометрическое давление ( $ДБ$ ) - это абсолютное давление земной атмосферы. Оно зависит от конкретных условий измерения: температуры воздуха и высоты над уровнем моря.

Давление, которое больше или меньше атмосферного, но измеряется относительно атмосферного, называют соответственно избыточным ( $ДИ$ ) или давлением разрежения, вакуумметрическим ( $ДВ$ ). Очевидно, что  $ДА = ДБ + ДИ$  или  $ДА = ДБ - ДВ$ . При измерении разности давлений сред в двух различных процессах или двух точках одного процесса, причем таких, что ни одно из давлений не является атмосферным, такую разность называют дифференциальным давлением ( $ДД$ ).

## **Системные и внесистемные единицы измерения давления**

Единицы измерения давления (СТ СЭВ 1052-89) определяются одним из двух способов:

1) через высоту столба жидкости, уравнивающего измеряемое давление в конкретном физическом процессе: в единицах водяного столба при  $4^{\circ}\text{C}$  (*мм. вод. ст.* или *м. вод. ст.*) или ртутного столба при  $0^{\circ}\text{C}$  (*мм. рт. ст.*, или *тор*) и нормальном ускорении свободного падения;

2) через единицы силы и площади.

В Международной системе единиц (*СИ*), принятой в 1960 году, единицей силы является *Н* (*Ньютон*), а единицей площади - *м*. Отсюда определяется единица давления паскаль  $\text{Па}=1\text{ Н/м}^2$  и ее производные, например, «*Килопаскаль*» ( $1\text{ КПа}=10^3\text{ Па}$ ), «*Мегапаскаль*» ( $1\text{ МПа}=10^3\text{ КПа}=10^6\text{ Па}$ ). Наряду с системой *СИ* в области измерения давления продолжают использоваться единицы и других, более ранних систем, а также внесистемные единицы.

В технической системе единиц *МКС* (*метр, килограмм-сила, секунда*) сила измеряется в «*килограммах силы*» ( $1\text{ кгс}\approx 9,8\text{ Н}$ ). Единицы давления в *МКС* -  $\text{кгс/м}^2$  и  $\text{кгс/см}^2$ ; единица  $\text{кгс/см}^2$  получила название *технической*, или метрической *атмосферы*. В случае измерения в единицах «*технической атмосферы*» избыточного давления используется обозначение (*ат*).

В физической системе единиц *СГС* (*сантиметр, грамм, секунда*) единицей силы является «*дина*» ( $1\text{ дин}=10^{-5}\text{ Н}$ ). В рамках *СГС* введена единица давления «*бар*» ( $1\text{ бар}=1\text{ дин/см}^2$ ). Существует одноименная внесистемная, метеорологическая единица *бар*, или стандартная атмосфера ( $1\text{ бар}=10^6\text{ дин/см}^2$ ;  $1\text{ мбар} = 10^3\text{ бар} = 10^3\text{ дин/см}^2$ ), что иногда, вне контекста, вызывает путаницу.

Кроме указанных единиц на практике используется такая внесистемная единица, как физическая, или нормальная атмосфера (*атм*), которая эквивалентна уравнивающему столбу  $760\text{ мм рт. ст.}$

В англоязычных странах широко распространена единица давления *psi* ( $psi = \text{lb}/\text{in}^2$ ) – фунт силы на квадратный дюйм ( $1 \text{ фунт} = 0,4536 \text{ кг}$ ).

В табл. 2.10 указаны коэффициенты перевода одних системных или внесистемных единиц давления в другие: например, одной «технической атмосфере» соответствует давление 0,980665 в барах (здесь «бар» является внесистемной единицей).

В действительности не всегда требуется столь высокая точность перевода единиц, которая отражена в таблице. Для приближительных оценок и расчетов давления с относительной погрешностью не более 0,5 % полезно использовать следующие соотношения:  $1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 10^4 \text{ кгс}/\text{м}^2 = 0,97 \text{ атм} = 0,98 \cdot 10^3 \text{ мбар} = 0,98 \text{ бар} = 10^4 \text{ мм. вод. ст.} = 10 \text{ м вод. ст.} = 735 \text{ мм рт. ст.} = 0,98 \cdot 10^5 \text{ Па} = 98 \text{ кПа} = 0,098 \text{ МПа}$ . С ошибкой в 2 % можно пренебречь разницей между технической атмосферой, стандартной атмосферой (баром) и десятой частью мегапаскаля ( $1 \text{ ат} = 1 \text{ бар} = 0,1 \text{ МПа}$ ), а с ошибкой в 3 % - разницей между технической и физической атмосферами ( $1 \text{ ат} = 1 \text{ атм}$ ). Диапазон давлений, измеряемых в технике, достигает 17 порядков: от  $10 \text{ Па}$  в электровакуумном оборудовании до  $10^3 \text{ МПа}$  при обработке металлов давлением. Материальным хранителем единиц давления являются первичные (национальные) и вторичные (рабочие) эталоны давления.

Для поддиапазона  $1\text{--}100 \text{ кПа}$  избыточных, абсолютных и разностных давлений в качестве первичного эталона используется, как правило, ртутный двухтрубный (*U*-образный) манометр с лазерным считыванием высоты мениска (погрешность считывания не более  $10^{-3} \text{ мм}$ , а абсолютная суммарная погрешность прибора, учитывающая в том числе и влияние температуры, не превышает 0,0005 % от верхней границы диапазона). Для поддиапазона  $100 \text{ кПа--}100 \text{ МПа}$  применяются газовые *грузопоршневые* манометры (точность 0,0035–0,004 % от показаний). Газовые и жидкостные *грузопоршневые* манометры используются и как рабочие эталоны для передачи единиц давления промышленным образцовым приборам (их точность 0,01–0,1 %).

Таблица 2.10

Таблица соответствия единиц давления

Системы единиц	Единицы давления	Па	кгс/см <sup>2</sup> (ат)	бар	атм	мм рт. ст.	мм вод. ст.	пси (psi)
СИ	1 Па = 1 н/м <sup>2</sup>	1	1,01972 · 10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-3</sup>	0,98692 · 10 <sup>-5</sup>	750,06 · 10 <sup>-5</sup>	0,101972	1,45 · 10 <sup>-4</sup>
МКСС*	1 ат = 1 кгс/см <sup>2</sup> (техническая атмосфера)	0,980665 · 10 <sup>5</sup>	1	0,980665	0,96784	735,563	10 <sup>4</sup>	14,223
Внесистемные	1 бар = 10 <sup>6</sup> дин/см <sup>2</sup>	10 <sup>5</sup>	1,01972	1	0,98692	750,06	1,01972 · 10 <sup>4</sup>	14,5
	1 атм = 760 мм рт.ст. (физическая атмосфера)	1,01325 · 10 <sup>5</sup>	1,0332	1,01325	1	760	1,0332 · 10 <sup>4</sup>	14,696
	1 мм рт. ст.	133,322	1,35951 · 10 <sup>-3</sup>	1,33322 · 10 <sup>-3</sup>	1,31579 · 10 <sup>-3</sup>	1	13,5951	0,019337
	1 мм вод. ст. = 1 кгс/м <sup>2</sup>	9,80665	10 <sup>-4</sup>	9,80665 · 10 <sup>-5</sup>	9,67841 · 10 <sup>-5</sup>	7,3556 · 10 <sup>-2</sup>	1	1,422 · 10 <sup>-3</sup>
	1 psi = 1 lbf/in <sup>2</sup>	6,894 · 10 <sup>3</sup>	≈ 0,07	6,894 · 10 <sup>-2</sup>	0,068	51,715	703,08	1

\* - техническая система единиц (метр, килограмм-сила, секунда)

Для поддиапазона  $1-100\text{кПа}$  избыточных, абсолютных и разностных давлений в качестве первичного эталона используется, как правило, ртутный двухтрубный ( $U$ -образный) манометр с лазерным считыванием высоты мениска (погрешность считывания не более  $10^{-3}\text{мм}$ , а абсолютная суммарная погрешность прибора, учитывающая в том числе и влияние температуры, не превышает  $0,0005\%$  от верхней границы диапазона). Для поддиапазона  $100\text{кПа}-100\text{МПа}$  применяются газовые *грузопоршневые* манометры (точность  $0,0035-0,004\%$  от показаний). Газовые и жидкостные *грузопоршневые* манометры используются и как рабочие эталоны для передачи единиц давления промышленным образцовым приборам (их точность  $0,01-0,1\%$ ).

### **2.2.2. Классификация средств измерения давления**

Для прямого измерения давления жидкой или газообразной среды с отображением его значения непосредственно на шкале, табло или индикаторе первичного измерительного прибора применяются манометры (ГОСТ 8.271-77). Если отображение значения давления на самом первичном приборе не производится, но он позволяет получать и дистанционно передавать соответствующий измеряемому параметру сигнал, то такой прибор называют измерительным преобразователем давления (ИПД), или датчиком давления. Возможно объединение этих двух свойств в одном приборе (манометр-датчик). Манометры классифицируют по принципу действия и конструкции, по виду измеряемого давления, по применению и назначению, по типу отображения данных и другим признакам (*рис. 2.17*).

*По принципу действия* манометры можно подразделить на:

- жидкостные (измеряемое давление уравнивается гидростатическим столбом жидкости (воды, ртути) соответствующей высоты);

- деформационные (давление определяется по величине деформации и перемещения упругого чувствительного элемента (УЧЭ) – мембраны, трубчатой пружины, сильфона);

- электрические (давление определяется на основании зависимости электрических параметров: сопротивления, емкости, заряда, частоты чувствительного элемента (ЧЭ) от измеряемого давления);

- грузопоршневые (измеряемое или воспроизводимое давление гидростатически уравнивается через жидкую или газообразную среду прибора давлением веса поршня с грузоприемным устройством и комплектом образцовых гирь) [26; 27].

*По виду измеряемого давления* манометры подразделяют на:

- собственно манометры (приборы для измерения избыточного и абсолютного давления);
- вакуумметры (приборы для измерения разрежения);
- мановакуумметры (приборы для измерения давления и разрежения);
- барометры (приборы для измерения атмосферного давления);
- дифференциальные манометры (дифманометры) (приборы для измерения разностного давления);
- напоромеры (приборы для измерения небольших (до 20-40 кПа) избыточных давлений газовых сред);
- тягомеры (приборы для измерения небольших (до 20-40 кПа) разрежений газовых сред);
- тягонапоромеры (приборы для измерения небольших (до 20-40 кПа) избыточных давлений и разрежений газовых сред);
- микроманометры (дифманометры с малым перепадом давления).

Технические характеристики всех этих средств измерения давления определяются соответствующими общими техническими условиями (ГОСТ 2405-88, ГОСТ 18140-81 и др.).

*По области применения* манометры подразделяют на:

- общепромышленные или технические (работающие в промышленных условиях при перепадах температур и влажности окружающей среды, вибрациях, загрязнении внешней среды и т. п.);
- лабораторные (приборы повышенной точности для использования в комфортных и стабильных условиях лабораторий);
- образцовые (для поверки рабочих манометров);
- эталонные (хранители единиц давления с целью передачи их образцовым приборам);
- специальные (применяются в экстремальных условиях: на железнодорожном транспорте, судах, котельных установках, при работе с кислотными и другими агрессивными средами).

*По типу отображения значений измеряемого давления* манометры подразделяют на:

- прямопоказывающие (с визуальным считыванием данных непосредственно по аналоговой (стрелочной) или цифровой шкале прибора);
- сигнализирующие (электроконтактные) (с выдачей управляющего электрического сигнала путем замыкания или размыкания контактов при достижении измеряемым давлением заранее установленного контрольного значения);
- регистрирующие (самопишущие) (с записью в память значений давления как функции времени и их отображением на электронном табло).

Манометры выполняют функцию локального контроля и в большинстве случаев из-за отсутствия возможности дистанционного доступа к их показаниям (за исключением манометров с унифицированным выходным электрическим сигналом) не могут использоваться для целей современной автоматизации. Такую возможность обеспечивают измерительные преобразователи давления.

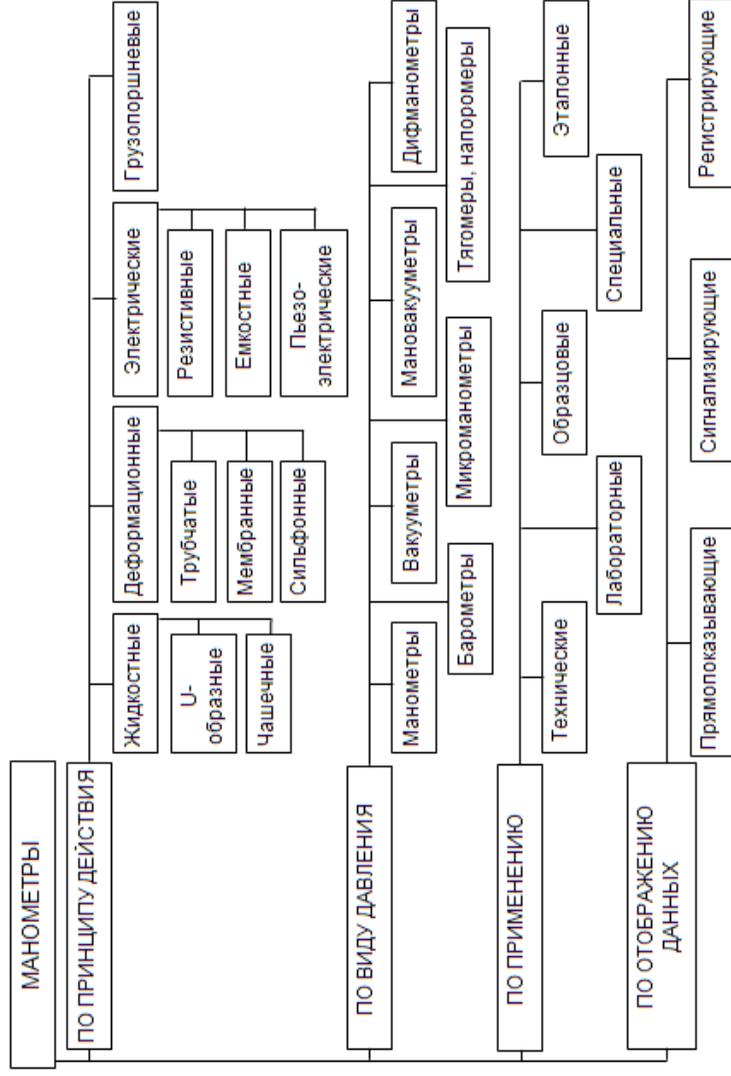


Рис. 2.17. Классификация манометров

Классифицируются эти приборы по принципу действия, виду измеряемого давления и типу выходного сигнала (рис. 2.18). ИПД различаются, кроме того, по используемым единицам измерения и ряду основных технических параметров (ГОСТ 22520-85).

*По принципу действия или способу преобразования* измеряемого давления в выходной сигнал ИПД подразделяются, прежде всего, на:

- деформационные (деформационные перемещения упругого чувствительного элемента (мембраны, силфона, трубки Бурдона) трансформируются с помощью дополнительных промежуточных механизмов и преобразователей в электрический или электромагнитный сигнал);

- электрические (измеряемое давление, оказывая воздействия на чувствительный элемент, изменяет его собственные электрические параметры: сопротивление, емкость или заряд, которые становятся мерой этого давления).

В последние годы получили развитие и другие принципы создания ИПД: волоконно-оптические, гальваноманометрические, объемного сжатия, акустические, диффузионные и т. д.

*По виду измеряемого давления ИПД* подразделяются на:

- преобразователи абсолютного давления (ДА);
- преобразователи избыточного давления (ДИ);
- преобразователи вакуумметрического давления (ДВ);
- преобразователи избыточного вакуумметрического давления (ДИВ);
- преобразователи дифференциального давления (ДД);
- преобразователи гидростатического давления (ДГ).

*По выходному сигналу* ИПД подразделяются на:

- аналоговые (измеряемое давление преобразуется в аналоговый унифицированный пневматический или электрический сигнал);
- цифровые.

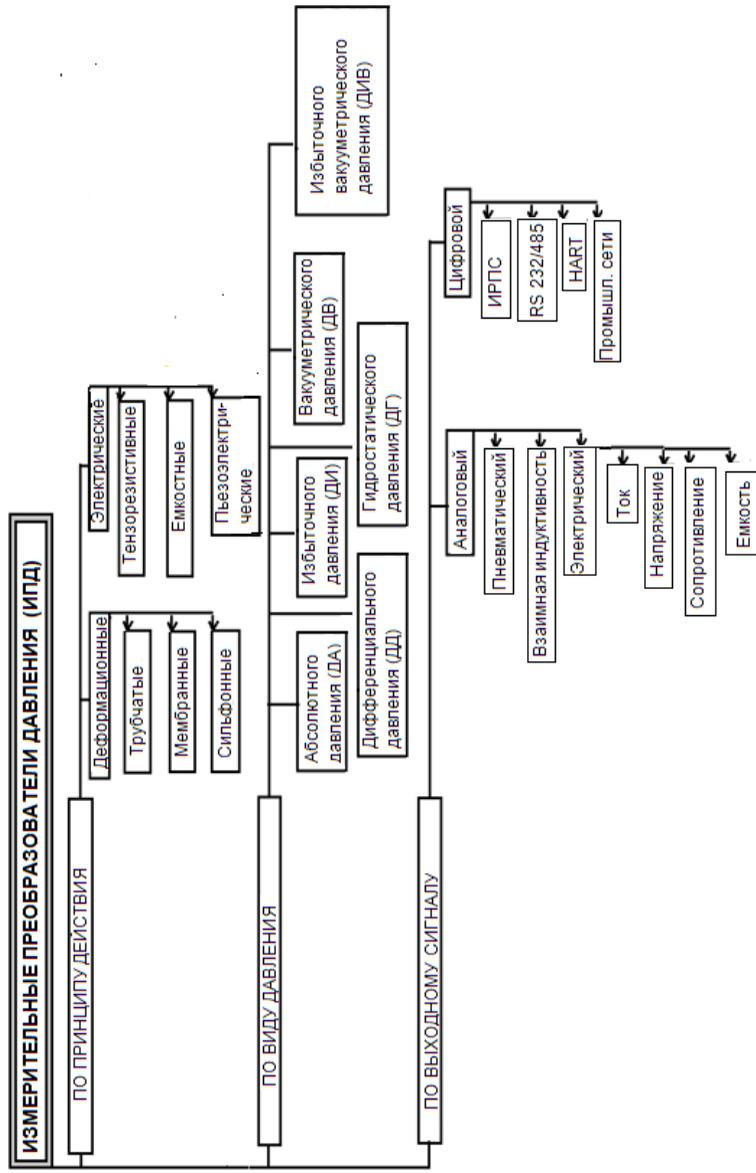


Рис. 2.18. Классификация измерительных преобразователей давления

Основной парк действующих ИПД относится к аналоговым с унифицированным токовым сигналом  $0...5$ ,  $0...20$  или  $4...20$  мА. В последнее десятилетие наметился переход к ИПД с цифровым выходом. Широкое распространение получил цифровой протокол *HART*. Этот открытый стандартный гибридный протокол двунаправленной связи предусматривает передачу цифровой информации поверх стандартного аналогового сигнала  $4...20$  мА. Бурно развивается системная интеграция первичных преобразователей с использованием различных разновидностей промышленных сетей (*Foundation Fieldbus, ModBus, Profibus* и др.). При этом используется полностью цифровой коммуникационный протокол для передачи информации в обоих направлениях между ИПД и системами управления, существенно облегчая взаимозаменяемость приборов разных мировых производителей. В отечественных цифровых ИПД пока преобладают такие цифровые интерфейсы, как ИРПС (интерфейс радиальной последовательной связи) и *RS-232C*.

### 2.2.3. Жидкостные манометры

Жидкостные манометры отличаются простотой конструкций и сравнительно высокой точностью измерения. Их широко применяют как в качестве переносных (лабораторных), так и технических приборов для измерения давления.

Переносной U-образный манометр, представляющий собой согнутую в виде буквы *U* стеклянную трубку 1, показан на *рис. 2.19*.

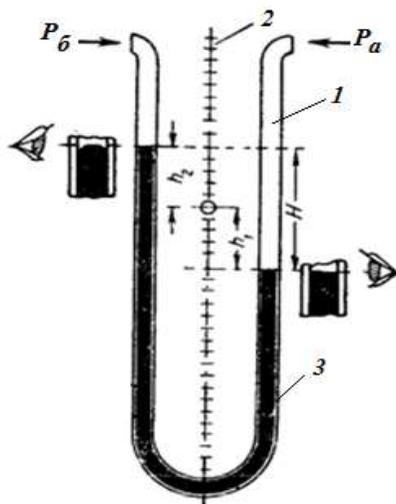


Рис. 2.19. U-образный манометр:

1 – трубка; 2 – шкала, где  $P_a$  – абсолютное давление в аппарате или трубопроводе,  $P_a$ ;  $P_6$  – атмосферное давление,  $P_a$ ;  $S$  – площадь сечения трубки,  $m^2$ ;  $H$  – разность уровней жидкости в обоих коленах или высота уравновешивающего столба жидкости,  $m$ ;  $\rho$  – плотность жидкости в манометре,  $kg/m^3$ ;  $\rho_1$  – плотность среды, находящейся над жидкостью в манометре,  $kg/m^3$ ;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ .

Трубка закреплена на доске со шкалой 2, расположенной между коленами трубки, и заполнена жидкостью (спиртом, водой, ртутью). Один конец трубки соединен с полостью, в которой измеряется давление, другой конец трубки сообщается с атмосферой.

Под действием измеряемого давления жидкость в трубке перемещается из одного колена в другое до тех пор, пока измеряемое давление не уравновесится гидростатическим давлением столба жидкости в открытом колене.

Система находится в равновесии, если гидростатическое давление столба жидкости в открытом колене уравновешивается давлением в другом колене:

$$P_a S = P_6 S + S H g (\rho - \rho_1). \quad (2.15)$$

Из уравнения (1.15):

$$P_u = P_a - P_{\sigma} = Hg(\rho - \rho_1). \quad (2.16)$$

Если над жидкостью в приборе находится газ, то

$$P_u = P_a - P_{\sigma} = Hg\rho. \quad (2.17)$$

Если давление в пространстве, с которым соединен прибор, ниже атмосферного, то жидкость в трубках переместится в обратном направлении, и высота ее столба будет соответствовать разрежению (вакууму).

Присоединив оба свободных конца трубки прибора к двум полостям с разными давлениями, можно по разности уровней жидкости в приборе определить разность давлений.

Прибор наполнен жидкостью до нулевой отметки шкалы. Для определения высоты столба жидкости необходимо делать два отсчета (снижения в одном колене, подъема в другом) и суммировать замеренные величины, т. е.  $H = h_1 + h_2$ .

Чашечный манометр, являющийся разновидностью U-образного, показан на *рис. 2.20*.

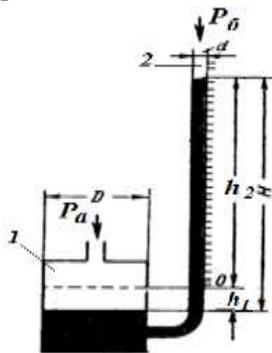


Рис. 2.20. Чашечный манометр:

1 – чашка; 2 – трубка

Одно из колен чашечного манометра выполнено в виде сосуда (чашки) 1, диаметр которого больше диаметра трубки 2, представляющей собой другое колено. Полость с измеряемым давлением (больше атмосферного) соединяется с чашкой, а трубка соединяется с атмосферой. Так как площадь сечения чашки больше площади

сечения трубки, жидкость под действием давления в чашке опускается на высоту  $h_1$ , которая меньше высоты подъема в трубке  $h_2$ . Обычно площадь сечения чашки значительно больше сечения трубки, поэтому величиной понижения уровня жидкости в чашке пренебрегают, и результат отсчитывают только по высоте столба жидкости в трубке от начального значения. Однако при этом возникает погрешность, вызванная понижением уровня жидкости в чашке, что изменяет положение нуля шкалы. Например, при диаметре чашки  $D$  в десять раз большем диаметра трубки  $d$ , получим:

$$h_1 = 0,01h_2, \quad (2.18)$$

т. е. относительная погрешность составит 1 %. Таким образом, погрешность прибора зависит от отношения площадей сечений трубки и чашки и может быть сколь угодно малой. На практике площади сечений чашки  $S$  и трубки  $s$  выбирают обычно такими, чтобы отношением  $s/S$  можно было пренебречь. В основном для чашечных приборов  $s/S \leq 1/400$ .

Давление определяется как:

$$P_u = P_a - P_\sigma = h_2 g (1 + s/S)(\rho - \rho_1). \quad (2.19)$$

#### 2.2.4. Деформационные датчики давления

В промышленной практике измерения давления и разности давлений широкое применение получили деформационные (с упругим чувствительным элементом) приборы. В этих приборах давление определяется по деформации упругих чувствительных элементов или по развиваемой ими силе, которые преобразуются передаточными механизмами в угловое или линейное перемещение указателя по шкале прибора.

По виду упругого чувствительного элемента пружинные приборы делятся на следующие группы:

- приборы с трубчатой пружиной;
- мембранные приборы;
- сильфонные приборы.

Манометры с трубчатой пружиной - один из наиболее распространенных видов деформационных приборов. Чувствительным

элементом таких приборов является согнутая по дуге окружности и запаянная с одного конца трубка 1 (трубка Бурдона) эллиптического, плоскоовального сечения или круглого сечения (рис. 2.21).

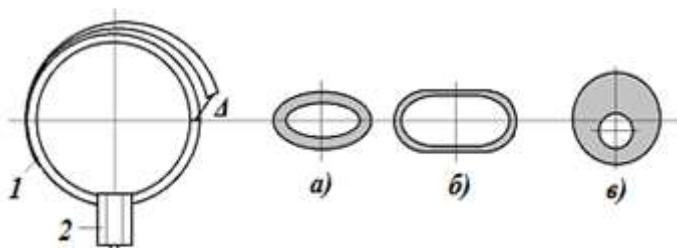


Рис. 2.21. Трубочатая пружина Бурдона:

а – эллиптического сечения; б – плоскоовального сечения; в – круглого сечения 1 – трубка; 2 – держатель

Третий вид трубок выполняют из легированной стали и используют для измерения высоких давлений (свыше  $98 \text{ МПа}$ ). Одним концом трубка заделана в держатель 2, оканчивающийся ниппелем с резьбой для присоединения к полости, в которой измеряется давление. Внутри держателя есть канал, соединяющийся с внутренней полостью трубки. Если в трубку подать жидкость, газ или пар под избыточным давлением, то кривизна трубки уменьшается, и она распрямляется; при создании разрежения внутри трубки кривизна ее возрастает, и трубка скручивается. Свойство изогнутой трубки некруглого сечения изменять величину изгиба при изменении давления обусловлено изменением формы сечения. Под действием давления внутри трубки эллиптическое или овальное сечение, деформируясь, приближается к круговому, что приводит к раскручиванию трубки, т. е. угловому перемещению ее свободного конца на небольшую величину  $\Delta$ .

В трубках круглого сечения, благодаря эксцентричному каналу, избыточное давление, действуя на заглушку свободного конца трубки, создает момент, вызывающий уменьшение ее кривизны. Это перемещение в определенных пределах пропорционально измеряемому давлению.

Перемещение свободного конца до определенного предела пропорционально давлению  $\Delta = k \cdot P$ . При дальнейшем повышении давления линейная зависимость нарушается – деформация начинает расти быстрее увеличения давления. Предельное давление, при котором еще сохраняется линейная зависимость между перемещением конца трубки и давлением, называется пределом пропорциональности трубки  $P_n$ . Предел пропорциональности является важнейшей характеристикой трубки. При переходе давления за предел пропорциональности трубка приобретает остаточную деформацию и становится непригодной для измерения. Чтобы не допустить возникновения остаточной деформации, наибольшее рабочее давление  $P_{max}$  (разрежение или разность давлений) назначают ниже предела пропорциональности  $P_n$ . Отношение  $P_n/P_{max} = k$  называется коэффициентом запаса. Во всех случаях коэффициент  $k$  должен быть больше единицы. Для максимального увеличения долговечности трубки и снижения влияния упругого последствия принимают  $k = 1,35-2,5$ .

В соответствии с этим шкалу манометра (верхний предел измерения) выбирают таким образом, чтобы рабочий предел измерения (наибольшее рабочее давление) был не более  $3/4$  верхнего предела измерения при постоянном давлении и не более  $2/3$  верхнего предела измерения при переменном давлении.

Верхние пределы измерения манометра выбирают из ряда: (1; 1,6; 2,5; 4 и 6)  $\cdot 10n$ , где  $n$  - целое положительное или отрицательное число.

Конструкция манометра с зубчатым секторным передаточным механизмом показана на *рис. 2.22*.

Перемещение  $\Delta$  свободного конца трубки под действием давления весьма невелико, поэтому в конструкцию прибора введен передаточный механизм, увеличивающий масштаб перемещения конца трубки. Манометры с трубчатой пружиной изготавливают на давление до  $1000 \text{ МПа}$ .

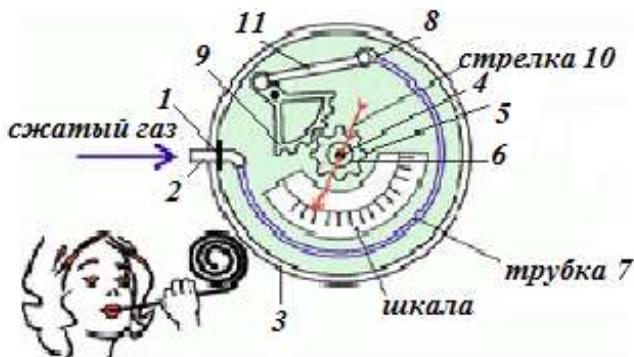


Рис. 2.22. Манометр с трубчатой пружиной:

- 1 – ниппель; 2 – держатель; 3 – корпус; 4 – ось; 5 – шестерня; 6 – пружина;  
 7 – трубчатая пружина; 8 – запаянный конец; 9 – зубчатый сектор;  
 10 – стрелка; 11 – тяга

### **Мембранные приборы**

Приборы с чувствительным элементом в виде плоских и гофрированных мембран, мембранных коробок и мембранных блоков применяют для измерения небольших избыточных давлений и разрежений (*манометры, напоромеры и тягомеры*), а также перепадов давления (*дифманометры*).

Мембрана представляет собой тонкий диск определенного диаметра, выполненный из металла или специального упругого материала, который жестко закрепляется по периметру в измерительном блоке (*рис. 2.23*).

Под воздействием измеряемого давления происходит прогиб мембраны на величину  $h$ , что в дальнейшем приводит к преобразованию этого перемещения во вращательное движение стрелки прибора.

Применяют плоские и гофрированные упругие мембраны. Наличие гофров делает статическую характеристику мембраны более линейной.

Мембраны выполняют из тонких металлических пластин (сталь, бронза, латунь). Они обладают достаточно большой собственной жесткостью, их статические характеристики, представля-

ющие зависимость перемещения  $h$  центра мембраны или развиваемой силы от давлений  $P_1$  и  $P_2$  или перепада  $\Delta P = P_1 - P_2$ , обычно нелинейны.

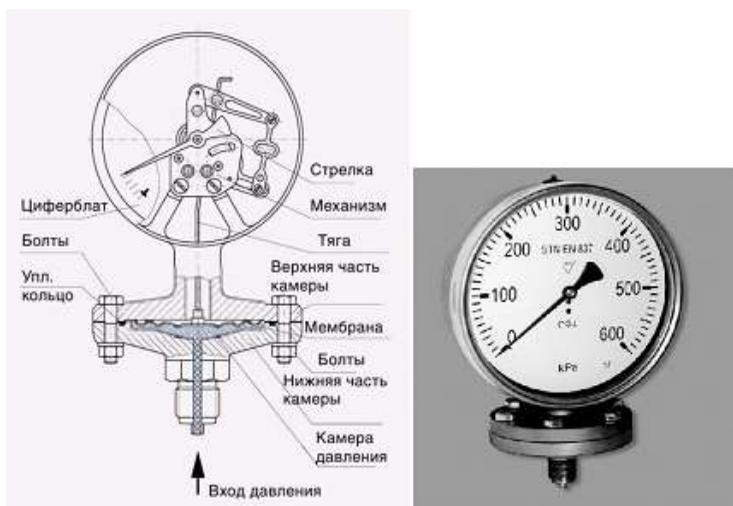


Рис. 2.23. Мембранный манометр

Упругие мембраны используют преимущественно как чувствительные элементы в первичных преобразователях, например, в *дифманометрах*. Величина прогиба мембраны является сложной функцией действующего на нее давления, ее геометрических параметров (диаметра, толщины, числа и формы гофров), а также модуля упругости материала мембраны. Число, форма и размеры гофра зависят от назначения прибора, пределов измерения и других факторов. Гофрировка мембраны увеличивает ее жесткость, т. е. уменьшает прогиб при одинаковом давлении. Из-за сложности расчета в большинстве случаев характеристику мембраны подбирают опытным путем. Для увеличения прогиба в приборах для малых давлений (разрежений) мембраны можно соединять попарно сваркой или пайкой (мембранные коробки), а коробки – в мембранные блоки.

### **Сильфонные приборы**

*Сильфон* – это тонкостенная металлическая камера с гофрированной боковой поверхностью (рис. 2.24). Изготавливают сильфоны из латуни, а также из нержавеющей стали или бериллиевой бронзы. Они применяются в качестве чувствительных элементов приборов давления, которые своевременно и точно реагируют на изменение давления.

При действии нагрузки (внешнего  $P_2$  или внутреннего  $P_1$  давления) длина сильфона изменяется, увеличиваясь или уменьшаясь в зависимости от направления приложенной силы. Наличие гофров позволяет перемещать подвижную часть сильфона на значительное расстояние (десятки миллиметров) без заметного изменения его характеристик. Выходная координата сильфона - перемещение  $h$ , входные - давления  $P_1$  и  $P_2$  или их разность  $\Delta P$ .

Существенными недостатками сильфонов являются значительный гистерезис и некоторая нелинейность характеристики. Для увеличения жесткости, уменьшения влияния гистерезиса и нелинейности часто внутрь сильфона помещают винтовую цилиндрическую пружину. В этом случае характеристика сильфона изменяется, так как к жесткости сильфона добавляется жесткость пружины.

Жесткость пружины обычно в несколько раз превышает жесткость сильфона, благодаря чему резко уменьшается влияние гистерезиса сильфона и некоторой нелинейности его характеристики. Расчетные формулы основных размеров сильфонов весьма сложны и не всегда подтверждаются опытом. Обычно диаметр сильфонов находится в пределах 20-80 мм.



Рис. 2.24. Сильфоны металлические

### **2.2.5. Электрические датчики давления**

В данных приборах измеряемое давление, оказывая воздействие на чувствительный элемент, изменяет его собственные электрические параметры: сопротивление, емкость или заряд, которые становятся мерой этого давления. Подавляющее большинство современных общепромышленных ИПД реализовано на основе трех основных принципов [30,31]:

1) емкостные – используют упругий чувствительный элемент в виде конденсатора с переменным зазором: смещение или прогиб под действием прилагаемого давления подвижного электродамембраны относительно неподвижного изменяет его емкость;

2) пьезоэлектрические – основаны на зависимости поляризованного заряда или резонансной частоты пьезокристаллов: кварца, турмалина и других от прилагаемого к ним давления;

3) тензорезисторные – используют зависимость активного сопротивления проводника или полупроводника от степени его деформации.

В последние годы получили развитие и другие принципы работы ИПД: волоконно-оптические, индукционные, гальваномагнитные, объемного сжатия, акустические, диффузионные и т. д.

На сегодняшний день самыми популярными в России являются тензорезисторные ИПД.

### ***Емкостные преобразователи давления***

Принцип действия емкостных преобразователей основан на изменении емкости переменного конденсатора  $C$  под воздействием преобразуемой неэлектрической величины (например, давления). Емкость конденсатора зависит от таких параметров, как расстояние между пластинами (обкладками)  $\delta$ , площадь пластин  $S$ , диэлектрическая постоянная между пластинами  $E$ .

Наибольшее применение в системах автоматики получили плоскопараллельные и цилиндрические преобразователи.

На *рис. 2.25* схематически изображено устройство плоскопараллельного емкостного преобразователя, основанного на изменении величины зазора  $x$  между пластинами (обкладками) конденсатора, причем одной из пластин может быть поверхность объекта (детали), не входящего в состав преобразователя, изменении площади  $S$  перекрытия пластин в результате их относительного смещения и изменении диэлектрической проницаемости материала  $\epsilon$ .

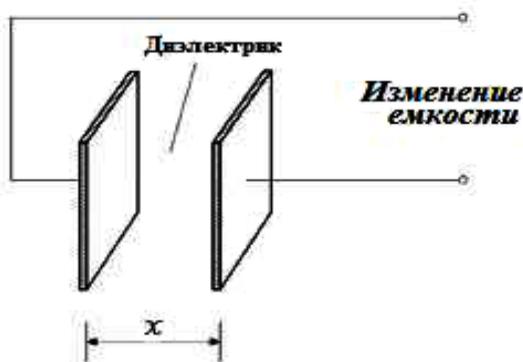


Рис. 2.25. Емкостной преобразователь с изменяющейся диэлектрической проницаемостью

Характеристика управления емкостного плоскопараллельного преобразователя с изменяющимся воздушным зазором определяется выражением:

$$C = \varepsilon \frac{S}{x}, \quad (2.20)$$

где  $C$  – емкость конденсатора,  $\Phi$ ;  $x$  – расстояние между обкладками,  $m$ ;  $\varepsilon$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды между обкладками,  $\Phi/m$ ;  $S$  – площадь обкладок,  $m^2$ . В этом случае емкость изменяется по линейному закону.

Основными достоинствами емкостных преобразователей являются: высокая чувствительность (до  $500 \text{ В/мм}$ ); простота конструкции; малые размеры и масса; малая инерционность; высокая точность и стабильность характеристик.

К недостаткам следует отнести: большое внутреннее сопротивление; влияние на работу преобразователя паразитных емкостей (требуется экранировка); необходимость усиления снимаемого сигнала; потребность источника напряжения высокой частоты; сильное влияние изменения температуры, влажности и загрязненности окружающей среды; для достижения максимальной чувствительности монтаж следует производить короткими проводами, что не всегда удобно.

### ***Пьезоэлектрические преобразователи давления***

Действие *пьезоэлектрических преобразователей* основано на свойстве некоторых кристаллических веществ создавать электрические заряды под действием механической силы. Это явление, называемое *пьезоэффектом*, характерно для кристаллов: *кварца, турмалина, сегнетовой соли, титаната бария* и некоторых других веществ.

Особенностью *пьезоэффекта* является его *безинерционность*. Заряды возникают мгновенно в момент приложения силы. Это обстоятельство делает пьезоэлектрические приборы незаменимыми при измерении и исследовании быстропротекающих процессов,

связанных с изменением давления (индицирование быстроходных двигателей, изучение явлений кавитации, взрывных реакций и т. п.).

Для изготовления *пьезоэлектрических датчиков* наиболее широко применяют *кварц*, сочетающий хорошие пьезоэлектрические свойства с большой механической прочностью, высокими изоляционными свойствами и независимостью пьезоэлектрической характеристики в широких пределах от изменения температуры.

В кристаллах *кварца* различают продольную ось  $ZZ$ , называемую оптической осью; ось  $XX$ , проходящую через ребра призмы (электрическую ось); и ось  $YY$ , проходящую через середины противоположащих граней (механическая или нейтральная). Если из кристалла кварца вырезать параллелепипед так, чтобы его грани были расположены перпендикулярно осям  $YY$  и  $XX$ , то он будет обладать пьезоэлектрическими свойствами. Элементарной структурной ячейкой является шестигранная призма (рис. 2.26).

Силы, приложенные к параллелепипеду в направлении оси  $ZZ$ , не вызывают электризации, а растягивающая или сжимающая силы  $F_x$ , приложенные в направлении электрической оси, вызывают появление разноименных зарядов на гранях, перпендикулярных к этой оси (*продольный пьезоэффект*).

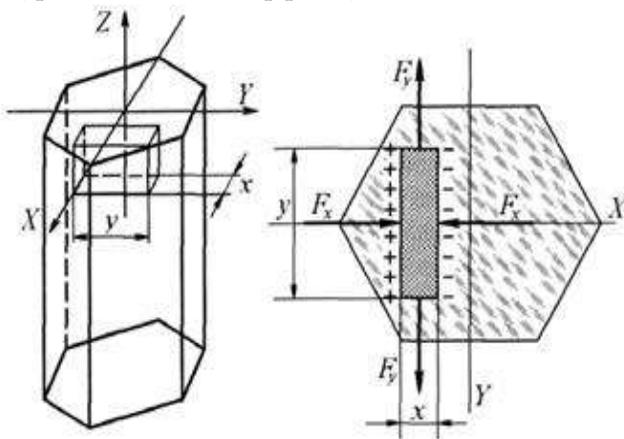


Рис. 2.26. Схема кристалла кварца

*Пьезоэлектрическая постоянная кварца практически не зависит от температуры до +500° С. При температуре выше +500° С она быстро уменьшается и при температуре +570°С становится равной нулю, т. е. кварц теряет пьезоэлектрические свойства.*

*Пьезоэлектрические приборы позволяют измерять давление до 100Мпа.*

Заряд, возникающий на гранях, равен:

$$q_x = kF_x = k \cdot P_x \cdot S_x, \quad (2.21)$$

где  $P_x$  и  $F_x$  - давление и сила, действующие на грань;  $S_x$  - площадь грани;  $k$  - постоянная величина, так называемый пьезоэлектрический модуль.

### **Тензорезисторные преобразователи давления**

В основе работы *тензопреобразователей (тензорезисторов)* лежит явление *тензоэффекта*, заключающееся в изменении активного сопротивления проводниковых и полупроводниковых материалов при их механической деформации.

По способу закрепления на чувствительных элементах датчиков они делятся на *наклеиваемые* и *ненаклеиваемые*, по конструктивному выполнению – на *проволочные*, *фольговые*, *полупроводниковые*.

*Проволочные тензопреобразователи (рис. 2.27)* конструктивно представляют собой отрезок тонкой проволоки  $l$  (диаметром 0,02...0,05 мм), которая зигзагообразно наклеена на тонкую бумажную или пленочную основу (подложку) 2.

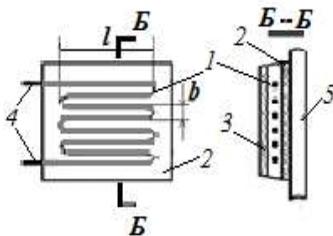


Рис. 2.27. Проволочный тензопреобразователь:

1— проволока; 2 – подложка; 3 – защитная пленка; 4 – медные выводы

Сверху проволока также закрыта тонкой бумагой, или лаковой пленкой 3, или фетром. Для включения в измерительную схему к концам проволоки припаиваются медные выводы 4.

Измерительной базой преобразователя является длина петель решетки, величина которой лежит в пределах  $1,5...100$  мм. Размер решетки  $5...10$  мм, номинальное сопротивление  $10...1000$  Ом, номинальный ток –  $30$  мА.

*Фольговые тензопреобразователи* (рис. 2.28) представляют собой дальнейшее развитие проволочных. В них вместо решеток из проволоки применяют решетку из фольги толщиной  $0,004...0,012$  мм.

Рисунок решетки выбирают таким, чтобы можно было снизить деформации, которая в фольговых *тензопреобразователях* практически сводится к нулю.

На рис. 2.28а представлена типовая форма *фольгового тензопреобразователя*, на рис. 2.28б – *розеточный преобразователь*, на рис. 2.28в – *короткобазовый*, на рис. 2.25г - для наклейки на круглую мембрану.

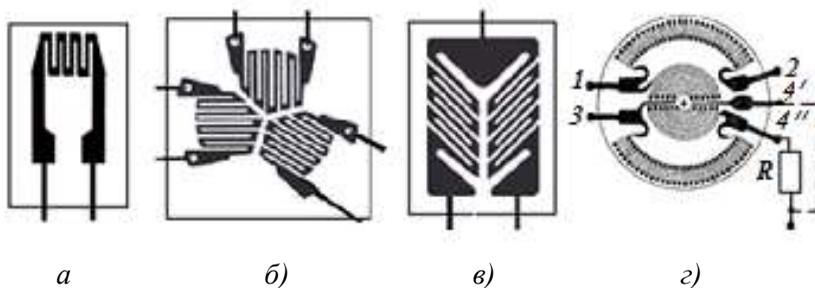


Рис. 2.28. Фольговые тензопреобразователи:

а – типовой; б – розеточный; в - короткобазовый; г – круговой

*Фольговые тензорезисторы* представляют собой весьма тонкую ленту из металлической фольги толщиной  $4-12$  мкм (например, фольги из константана, золотосеребряных сплавов и др.), наклеенной на подложку. Необходимая конфигурация чувствительного элемента получается протравливанием определенных участков

фольги. Поперечная чувствительность *фольговых тензорезисторов* меньше за счет расширения поперечных участков.

При построении системы контроля нагрузки на различные механические конструкции обычно применяется несколько *тензодатчиков* или системы датчиков, оси которых пересекаются под различными углами либо идут параллельно. Поэтому для упрощения монтажа обычно используют датчики, имеющие несколько *тензорезистивных элементов* и уже расположенных под определенным углом (если кроме величины деформации необходимо определить направление деформации, то применяется комбинация *тензодатчиков*, представляющих геометрическую структуру.

Например, три *тензорезистора*, ориентированные под углом  $120^\circ$  один по отношению к другому. Эта конструкция известна под названием *розеточный тензодатчик* (рис. 2.28б) и применяется при измерении напряжений детали, находящейся в плосконапряженном состоянии, в том случае, когда направления действия напряжений неизвестны. По изменениям сопротивлений *трех тензорезисторов* определяются направления главных напряжений и их значения. Элемент показан на рисунке.

Рис. 2.28в состоит из двух *тензорезисторов* и используется при измерении деформаций валов при их скручивании. *Фольговые тензодатчики* характеризуются предельной деформацией  $\epsilon_l = \pm 5\%$ .

В настоящее время получили распространение *пленочные тензорезисторы*, которые изготавливают путем вакуумной возгонки *тензочувствительного материала* с последующей конденсацией его на подложку через маску. Для *пленочных тензорезисторов* используются как металлические материалы (например, *титаноалюминиевые сплавы*), так и полупроводниковые материалы, например, *германий, кремний*. *Пленочные тензорезистивные ПИП* могут иметь толщину менее  $1\ \mu\text{м}$ .

На рисунке 2.28г изображен элемент, состоящий из четырех *тензорезисторов*, образующих четыре плеча моста. Этот элемент наклеивается на мембрану. *Тензорезисторы*, расположенные в цен-

тре, испытывают растяжение, а на периферии – сжатие. К выводам 2 и 3 подводится питание, выводы 1, 4 и 4' образуют измерительную диагональ. Выводы 4' и 4'' разомкнуты для того, чтобы можно было включить добавочный резистор  $R$  в нужное плечо и добиться подбором  $R$  равновесия моста [31; 32].

*Фольговые тензопреобразователи* могут пропускать больший ток, чем *проволочные*, благодаря большей площади поперечного сечения проводника при тех же размерах решетки и большей теплоотдаче, улучшающей теплообмен вследствие большей площади прилегания к деформируемой детали (чувствительному элементу датчика). Благодаря этому можно увеличить значение номинального тока до 0,2 А. Сопротивление *фольговых тензопреобразователей* равно 30...250 Ом.

В качестве материала решеток *проволочных* и *фольговых тензопреобразователей* применяются как чистые металлы (*серебро, платина, медь*), так и сплавы (*константан, нихром, манганин* и др.).

Основными достоинствами *проволочных* и *фольговых тензопреобразователей* являются: практически полное отсутствие их влияния на деформацию детали; линейность характеристики; низкая стоимость.

Основным недостатком является относительно низкий температурный диапазон работоспособности: от  $-40$  до  $+70$  °С.

*Полупроводниковые тензопреобразователи* отличаются от *проволочных* и *фольговых* большим (до 50 %) изменением сопротивления при деформации и более высоким пределом чувствительности к температуре (в 10...20 раз).

Их преимущества заключаются в более высоком (в 60 раз) коэффициенте *тензочувствительности*, малых размерах (длина базы  $A = 3...10$  мм), больших значениях выходного сигнала.

Наиболее сильно *тензоэффект* выражен в таких полупроводниковых материалах, как *германий, кремний, антимонид индия, фосфид индия, арсенид галлия, антимонид галлия*. Для *тензопреобразователей* чаще применяют *германий* и *кремний*

в виде пластин толщиной  $0,03...0,2$  мм, шириной  $0,5...1$  мм и длиной (базой)  $3...15$  мм.

Существует несколько способов изготовления *полупроводниковых тензопреобразователей*: вырезание из полупроводникового монокристалла; выращивание монокристалла посредством конденсации паров; нанесение на некоторые виды подложек тонких пленок со свойствами монокристаллов; получение диффузионным способом.

Особенно широкое применение в изготовлении общепромышленных *тензорезисторных полупроводниковых датчиков (ТПД)* в силу своих высоких механических, изолирующих и теплоустойчивых качеств получила технология КНС – «кремний на сапфире». Упрощенная конструкция чувствительного элемента *тензопреобразователя*, основанного на данной технологии, представлена на *рис. 2.29*.

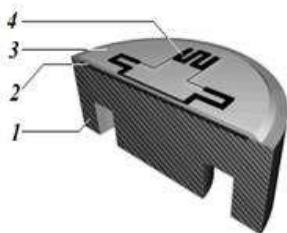


Рис. 2.29. Чувствительный элемент полупроводникового тензопреобразователя:

1 – титановая мембрана; 2 – серебросодержащий припой; 3 – сапфировая подложка; 4 – тензорезисторы

Чувствительный элемент состоит из сапфировой подложки 3, на которую диффузионным способом нанесены тензорезисторы 4 (чаще всего в виде уравновешенного измерительного моста Уитстона). Подложка припаяна твердым припоем 2 к титановой мембране 1.

Чувствительный элемент включается в общую измерительную цепь преобразователя давления, структурная схема которого представлена на *рис. 3.30*.

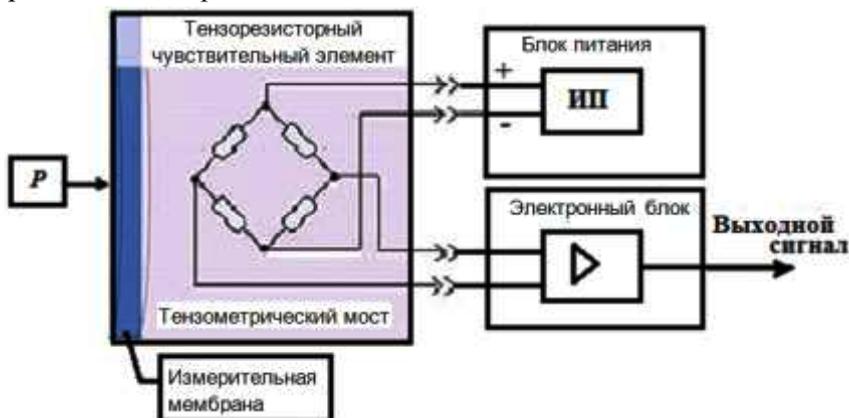


Рис. 2.30. Структурная схема тензорезисторного преобразователя давления

Деформация измерительной мембраны под воздействием внешнего давления  $P$  приводит к локальным деформациям *тензорезисторного* моста, состоящего из постоянных *тензорезисторов*  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  и переменного  $R_1$ . В результате происходит разбаланс моста, который преобразуется электронным блоком в унифицированный выходной электрический сигнал.

Основными недостатками полупроводниковых тензопреобразователей являются: малая гибкость, небольшая механическая прочность, нелинейность характеристики, большой разброс характеристик однотипных преобразователей, нестабильность параметров. Однако, несмотря на данные недостатки, основная масса датчиков давления в нашей стране выпускаются на основе *тензорезисторных чувствительных элементов*. Конструкция одной из моделей такого датчика представлена на *рис. 2.31*.

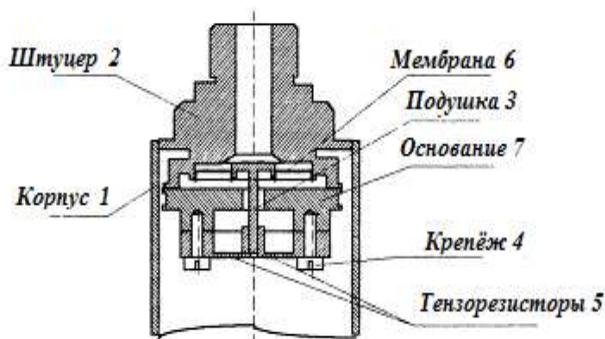


Рис. 2.31. Конструкция измерительного преобразователя давления

К преимуществам данного типа чувствительных элементов можно отнести достаточно высокий температурный диапазон работоспособности (от  $-160$  до  $+1500^{\circ}\text{C}$ ), хорошую защищенность чувствительного элемента от воздействия любой агрессивной среды, налаженное серийное производство, низкую стоимость.

*Мембранный тензопреобразователь* размещен внутри основания 7. Внутренний канал *тензопреобразователя* заполнен кремнийорганической жидкостью и отделен от измеряемой среды металлической гофрированной мембраной 6, приваренной по наружному контуру к основанию 7. Измеряемое давление подается через штуцер в камеру фланца и воздействует на мембрану 6, через жидкость воздействует на мембрану *тензопреобразователя*, вызывая ее прогиб и изменение *сопротивления тензорезисторов*.

Электрический сигнал от *тензопреобразователя* передается из измерительного блока в электронный блок по проводам через *гермовыводы*.

### 2.2.6. Грузопоршневой манометр [33]

Принцип действия *грузопоршневого манометра* основан на уравнивании сил, создаваемых, с одной стороны, измеряемым давлением, а с другой стороны – грузами, действующими на поршень, помещенный в цилиндр (рис 2.32).

Прибор состоит из колонки 1 с цилиндрическим шлифованным каналом и поршня 2, несущего на своем верхнем конце тарелку 4 для нагружения ее эталонными грузами 5. Поршень 7 винтового пресса 6 служит для подъема и опускания поршня 2 так, чтобы при любых нагрузках поршень 2 был погружен в цилиндр примерно на 2/3 своей высоты.

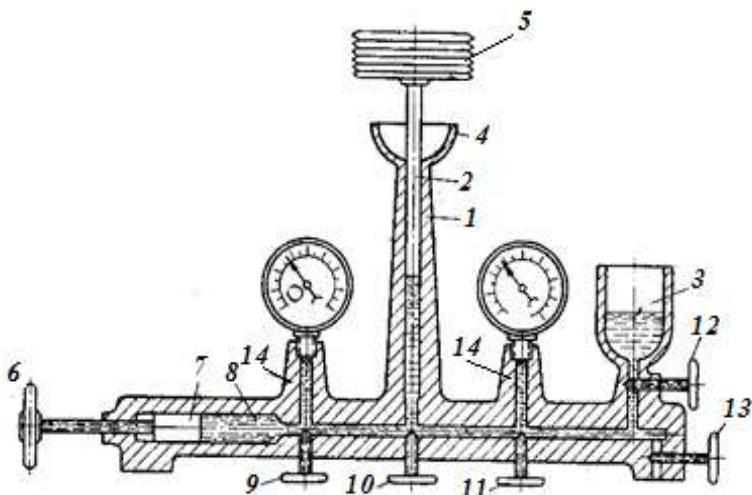


Рис. 2.32. Грузопоршневой манометр:

- 1 – колонка; 7, 2 – поршень; 3 – воронка; 4 – тарелка; 5 – грузы;  
6 - маховик; 8 – камера; 9,10,11,12,13 - вентиль; 14 – штуцер

Камеру 8 поршневого манометра заполняют трансформаторным, вазелиновым или касторовым маслом через воронку 3. Давление в системе создают с помощью винта с маховиком 6 и поршня 7. Штуцеры 14 служат для установки поверяемого и образцового манометров. Вентиль 10 предназначен для слива масла. В процессе измерений для устранения вредных сил трения поршня 2 о стенки цилиндрического канала колонки 1 поршень 5 вручную приводят во вращение.

*Грузопоршневой манометр* может быть использован для проверки манометров как с помощью грузов, так и с помощью образцового манометра.

## § 2.3. Измерение количества и расхода [34-42]

### 2.3.1. Основные понятия, единицы измерения

Количество вещества выражают в единицах объема или массы. В системе СИ за единицу объема принят кубический метр ( $m^3$ ), а за единицу массы – килограмм ( $кг$ ). Количество газа измеряют объемным методом.

Для получения сравнимых результатов измерений необходимо объем газа привести к следующим нормальным условиям: температура  $20^\circ C$  ( $293,15^\circ K$ ), давление  $101325 Pa$  ( $760 мм рт. ст.$ ), относительная влажность  $\phi = 0$ . Приборы, измеряющие количество вещества, называются счетчиками. Счетчики измеряют протекающий через них объем вещества за любой промежуток времени: сутки, месяц и т. д. Количество вещества при этом определяется как разность показаний счетчика.

Расходом вещества называется количество вещества, проходящее через данное сечение канала в единицу времени. Объемный расход  $Q$  определяется как произведение скорости потока  $v$  на площадь отверстия истечения  $S$ , т. е.

$$Q = vS. \quad (2.22)$$

Объемный расход в системе СИ измеряется в  $m^3/c$  (в производных условиях чаще используется единица  $m^3/ч$ ).

Массовый расход  $Q_m$  получают умножением объемного расхода  $Q$  на плотность  $\rho$  жидкости, газа или пара, т. е.

$$Q_m = Q\rho. \quad (2.23)$$

За единицу измерения массового расхода принят  $кг/c$  (на практике чаще используется  $т/ч$ ).

Приборы, измеряющие расход, называются расходомерами. Эти приборы могут быть снабжены счетчиками (интеграторами), тогда они называются расходомерами со счетчиком. Такие расходомеры позволяют измерять расход и количество вещества.

В зависимости от принятого метода измерения приборы для измерения расхода и количества подразделяются на:

- расходомеры переменного перепада давления;

- расходомеры постоянного перепада давления;
- бесконтактные расходомеры: электромагнитные, ультразвуковые;
- кориолисовы расходомеры;
- вихревые расходомеры;
- калориметрические расходомеры и др.

### **2.3.2. Измерение расхода жидкости и газа**

Количество жидкости или газа можно измерить счетчиками. По принципу действия счетчики подразделяются на объемные, массовые и скоростные. Для измерения количества жидкости применяют преимущественно объемные и скоростные счетчики, для измерения объема газа – объемные счетчики. Для каждого счетчика существует определенный минимальный расход, ниже которого резко возрастает основная погрешность.

Номинальным называется наибольший длительный расход, при котором погрешность измерения не выходит за пределы установленных норм, а потеря напора не создает в счетчике усилий, приводящих к быстрому износу его деталей. Характерным расходом называется количество вещества, которое проходит через счетчик за  $1$  ч при установившемся потоке и потере напора  $0,1$  МПа. Характерный расход является условной величиной и служит мерой оценки счетчиков различных конструкций.

Потери напора представляют собой разность давлений на входе в счетчик и выходе из него.

Калибром счетчика называется диаметр условного прохода входного патрубка, выраженный в миллиметрах.

#### ***Скоростные счетчики для жидкостей***

Эти счетчики служат для измерения количества жидкостей. Они основаны на принципе измерения средней скорости движущегося потока.

Количество жидкости  $Q$  связано со средней скоростью движущегося потока соотношением:

$$Q = v_{cp} S, \quad (2.24)$$

где  $v_{cp}$  – средняя скорость движения вещества,  $м/с$ ;  $S$  – поперечное сечение потока,  $м^2$ .

О количестве жидкости, прошедшей через прибор, судят по числу оборотов лопастной вертушки, расположенной на пути потока. Считается, что скорость вращения вертушки пропорциональна средней скорости потока

$$n = c v_{cp},$$

с учетом уравнения (2.22)

$$n = c (Q/S), \quad (2.25)$$

где  $n$  - число оборотов вертушки;  $c$  - коэффициент пропорциональности, характеризующий механические и гидравлические свойства прибора. По форме вертушки скоростные счетчики разделяются на две группы: с винтовой вертушкой и крыльчатые. Винтовые вертушки размещают параллельно измеряемому потоку, крыльчатые – перпендикулярно ему. На *рис. 2.33* показан скоростной счетчик с винтовой вертушкой, закрепленной на горизонтальной оси.

В корпусе *1*, снабженном фланцами для присоединения к трубопроводу, установлена вертушка *2* с лопастями, изогнутыми по винтовой линии.

Вертушку изготавливают из пластмассы при рабочей температуре до  $30^{\circ}C$  и из латуни при более высоких температурах. На ось вертушки перед задним закрытым подшипником *3*, закрепленным в крестовине *4*, насажан червяк *5*, сцепляющийся с червячной шестерней, передающей вращение передаточному механизму *б*. От механизма движение передается оси, проходящей через сальник *7*, и счетному механизму *8*.

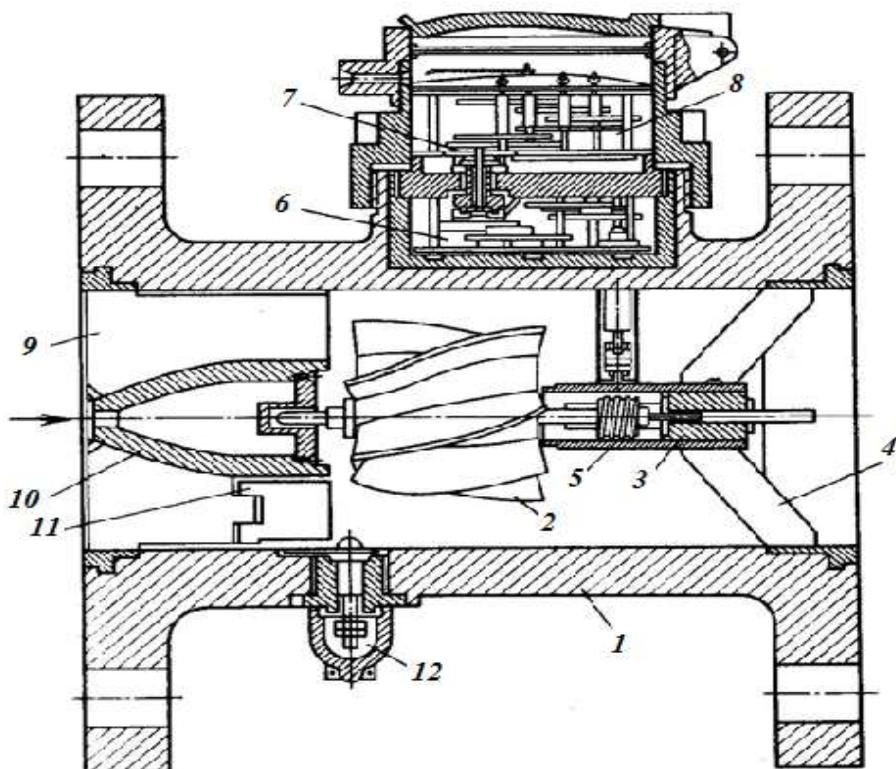


Рис. 2.33. Скоростной счетчик с винтовой вертушкой:

- 1 – корпус; 2 – вертушка; 3 – подшипник; 4 – крестовина; 5 – червяк;  
 6 – передаточный механизм; 7 – сальник; 8 – счетный механизм;  
 9 – струевыпрямитель; 11 – лопасть; 12 – рычажный привод

Перед вертушкой со стороны входа жидкости установлен *струевыпрямитель* 9, состоящий из нескольких радиально закрепленных прямых пластин. Конец одной из пластин *струевыпрямителя* поворачивается вокруг вертикальной оси, образуя лопасть 11, служащую для регулирования счетчика через рычажный привод 12. В *струевыпрямителе* закреплен передний подшипник 10 оси вертушки.

Механическое сопротивление (трение в подшипниках, сальнике и т. п.) влияет на скорость вращения вертушки, а при некоторой минимальной скорости потока вертушка будет неподвижна.

В зависимости от способа подвода жидкости счетчики с крыльчатой вертушкой подразделяются на одноструйные и многоструйные. Как в одноструйных, так и в многоструйных счетчиках жидкость подводится тангенциально к лопастям вертушки. Счетчики с крыльчатой вертушкой устанавливают на горизонтальных участках трубопроводов.

Счетчики с винтовой вертушкой применяют при давлении жидкости до  $1,0$  МПа и при длительной нагрузке до  $600$  м<sup>3</sup>/ч. Погрешность счетчиков составляет 2-3 % действительного значения.

### ***Объемные счетчики для жидкостей***

Принцип работы *объемных счетчиков* заключается в измерении определенного объема жидкости, вытесняемого из измерительной камеры под воздействием разности давлений.

*Объемные счетчики* выпускаются двух типов: лопастные и с овальными зубчатыми колесами. Принцип действия лопастных счетчиков основан на том, что поток измеряемой жидкости, поступающая через входной патрубок, проходит через измерительную камеру, где теряет часть напора на создание крутящего момента, приводящего во вращение ротор с выдвигающимися лопастями.

На *рис. 2.34* показано несколько положений ротора, иллюстрирующих части цикла, в течение которого ротор совершает пол-оборота, что соответствует половине емкости измерительной камеры.

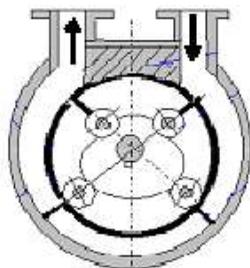


Рис. 2.34. Лопастной счетчик

Измерение объемного количества жидкости происходит при периодическом отсекании определенных объемов жидкости, заключенных в полости между двумя лопастями и цилиндрическими поверхностями измерительной камеры и барабана. За один полный оборот ротора отсекаются четыре объема, сумма которых равна емкости измерительной камеры.

На *рис. 2.35* показан счетчик с овальными зубчатыми колесами. Поток жидкости, проходя через счетчик, теряет часть своей энергии на вращение овальных колес. В зависимости от расположения колес относительно входа потока жидкости каждое из них является поочередно то ведущим, то ведомым.

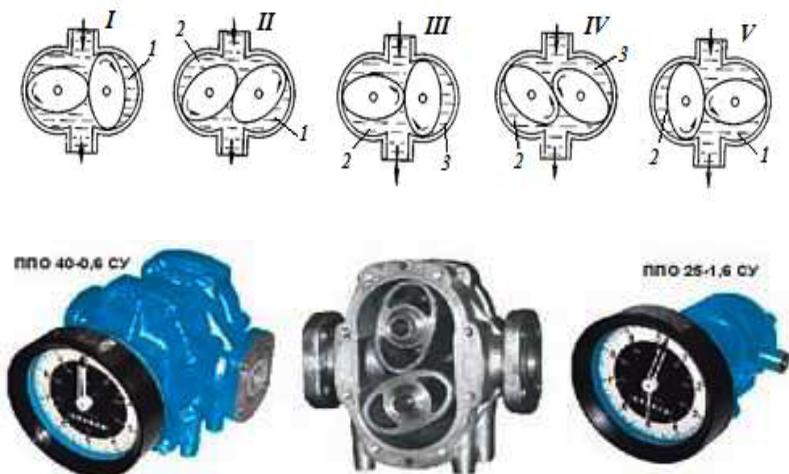


Рис. 2.35. Счетчик с овальными зубчатыми колесами

При вращении овальных колес периодически отсекается определенный объем жидкости, ограниченный овалом колеса и стенкой измерительной камеры. За один оборот колес отсекается четыре определенных объема жидкости, которые в сумме равны свободному объему измерительной камеры, счетчика. Количество жидкости, прошедшей через *счетчик*, определяют по числу оборотов овальных колес. В положении *I* жидкость вращает правое колесо по часовой стрелке, а правое колесо вращает левое против

часовой стрелки. В этом положении правое колесо отсекает определенный объем жидкости 1.

В положении II левое колесо заканчивает отсечение нового объема жидкости 2, а правое выталкивает ранее отсеченный его объем жидкости 1 в выходной патрубке счетчика. В этом положении крутящий момент передается на оба колеса. В положении III ведущим является левое колесо, которое к этому времени уже отсекло объем 2. Оно вращает правое колесо по часовой стрелке. Дальнейшее вращение колес происходит аналогично (положения IV и V).

*Счетчики* с овальными колесами выпускаются промышленностью для различных диаметров трубопроводов при рабочем давлении до 1,57 МПа. Потеря напора от установки *счетчика* составляет примерно 0,02 МПа. Погрешность показаний этих приборов  $\pm 0,5\%$ .

Для измерения объемов очень вязких жидкостей (мазут и др.) в *счетчиках* предусматривают паровую рубашку.

### ***Барабанные счетчики для газов***

Работа этих счетчиков основана на непрерывном отмеривании и отсчете равных объемных порций газа. Число этих объемов регистрируется счетным механизмом (рис. 2.36).

В герметичном цилиндрическом кожухе 2, заполненном несколько более, чем наполовину затворной жидкостью, вращается концентрично расположенный барабан (3-4-5-6), разделенный четырьмя радиальными и одной цилиндрической перегородками на пять камер А-Д. Камеры А-Г сообщаются с пространством кожуха 2 щелями *a*, *b*, *c* и *d* внутренней камерой Д через щели *a'*, *b'*, *c'* и *d'*.

В камеру Д через полую ось входит подающая газ труба 1, а в верхней части кожуха установлена отводящая труба 7. Радиальные перегородки и соединяющие щели расположены так, что газ последовательно заполняет камеры А-Г. Перепад давлений в трубах 4 и 5 заставляет барабан вращаться по часовой стрелке. Входная

и выходная щели каждой камеры никогда не могут быть одновременно над уровнем жидкости, следовательно, прямой переток газа из трубы 4 в трубу 5 исключается.

Каждая камера заполняется определенным объемом газа, вытесняемого из камеры в кожух прибора при выходе выпускной щели из-под уровня запирающей жидкости.

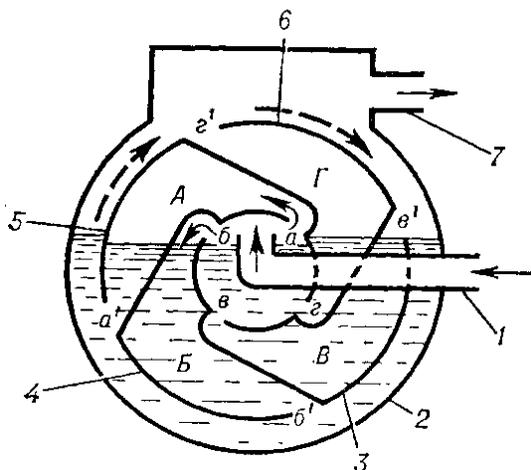


Рис. 2.36. Барабанный счетчик:

1 – подающая газ труба; 2 – кожух; (3,4,5,6) – барабан;  
7 – отводящая газ труба; А-Г – камеры

Вращение барабана 3 передается счетному механизму, расположенному снаружи кожуха. За один оборот через барабан проходит объем газа, равный сумме объемов камер, отсекаемых жидкостью. Запирающей жидкостью служит обычно вода. В случае опасности замерзания воды используют водный раствор хлорида магния или глицерин.

*Барабанные счетчики* применяют для измерения светильного, газогенераторного, коксового и других нейтральных газов, заметно не растворяющихся в затворной жидкости и не воздействующих на материал счетчика.

Обязательным условием работы *барабанных газовых счетчиков* является постоянство уровня жидкости в кожухе счетчика.

Для контроля уровня жидкости счетчик снабжают водомерным стеклом или устройством для поддержания постоянства уровня.

*Барабанные счетчики газа* представляют собой очень точные приборы, их погрешность не превышает 0,2 %. Однако, они редко выпускаются производительностью более 3 м<sup>3</sup>/ч, так как при большой производительности габариты их слишком велики.

### **Ротационные счетчики для газов**

Из счетчиков для газов наиболее распространены *ротационные счетчики* (рис. 2.37). Они предназначены для измерения больших количеств газа.

Счетчик состоит из кожуха 1, внутри которого вращаются на параллельных горизонтальных валах роторы 2.

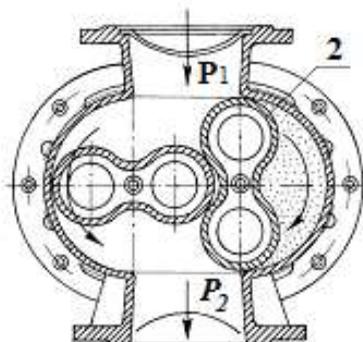


Рис. 2.37. Принципиальная схема ротационного счетчика:

2 – роторы; 1 – кожух

Валы роторов связаны зубчатыми колесами, находящимися вне кожуха. От одного из валов вращение передается счетному механизму. Шарико- или роликоподшипники валов, а также зубчатые колеса находятся в масляных ваннах и заключены в картеры. Тонкий валик, соединяющий вал ротора со счетным механизмом, проходит через сальник в стенке картера. Зазор между роторами и кожухом очень мал (порядка 0,12 мм).

В положении, изображенном на схеме, правый ротор не вращается под действием газа (давления на обе стороны ротора одина-

ковые). На верхнюю часть левого ротора действует газ с более высоким давлением, чем на нижнюю; левый ротор поворачивается, увлекая за собой правый. Когда правый ротор стоит вертикально (а левый - горизонтально), то он поворачивает левый. За один оборот обоих роторов объем газа, прошедшего через прибор, равен объему измерительной камеры счетчика. Перепад давлений газа в счетчике контролируется дифференциальным манометром.

*Ротационные счетчики* применяют для измерения расхода газа от 40 до 10 000 м<sup>3</sup>/ч. Погрешность измерений составляет ±2-3 %. Счетчик допускает кратковременную перегрузку до 30 %.

### **Насосы-дозаторы**

Насосы-дозаторы с возвратно-поступательным движением поршня (рис. 2.38) служат для дозирования различных химически активных жидкостей.

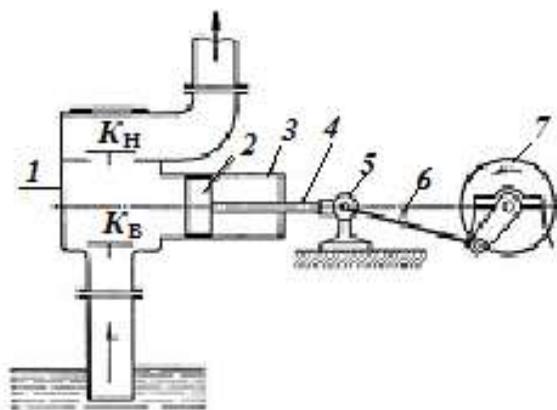


Рис. 2.38. Насос-дозатор:

- 1 – корпус нагнетательной камеры; 2 - поршень; 3 – корпус гидроцилиндра; 4 – шток; 5 – редуктор; 6 – привод; 7 – червячное колесо;  
Кв – входной клапан; Кн – выходной клапан

На всасывающей и нагнетательной линиях этих насосов установлены клапаны. Когда привод 6 перемещает поршень 2 слева-направо, происходит наполнение цилиндра через входной клапан

$K_B$ , а когда поршень, достигнув крайнего положения, перемещается справа-налево, клапан  $K_B$  на входе закрывается, а клапан  $K_H$  на выходе открывается, и жидкость вытесняется в приемное устройство.

### 2.3.3. Расходомеры переменного перепада давления

Из парка существующих расходомеров более 60 % составляют расходомеры переменного перепада давления. Такое широкое их применение объясняется невысокой стоимостью, простотой конструкции и эксплуатации, а также отсутствием необходимости в дорогостоящих образцовых установках для градуировки. Из более чем двухсот типов, используемых в мировой практике, эти расходомеры являются единственными нормализованными средствами измерения расхода.

Измерение расхода по этому методу основано на изменении потенциальной энергии (статического давления) вещества, протекающего через *сужающее устройство* в трубопроводе.

*Сужающим устройством* называется техническое устройство, устанавливаемое в измерительном трубопроводе, со сквозным отверстием для создания перепада давления среды путем уменьшения площади сечения трубопровода (сужения потока).

В измерительной технике в качестве сужающих устройств (первичных преобразователей) используют *стандартные диафрагмы, сопла, сопла и трубы Вентури* [43-47].

*Стандартные диафрагмы* (рис. 2.39) являются самым распространенным типом сужающего устройства. Она представляет собой тонкий металлический диск с круглым концентрическим отверстием, которое имеет со стороны входа острую цилиндрическую кромку, а далее расточено под углом  $\varphi=30-60^\circ$ . Диафрагмы бывают двух основных типов: *камерные* (рис. 2.39а) и *бескамерные* (рис. 2.39б).



Рис. 2.39. Диафрагмы:  
а – камерная; б – бескамерная

*Бескамерные диафрагмы* отличаются от камерных отсутствием кольцевых камер, а также наличием металлического ушка, приваренного к боковой поверхности диска. Представляет собой тонкий металлический диск с круглым концентрическим отверстием, которое имеет со стороны входа острую цилиндрическую кромку, а далее расточено под углом  $\varphi=30-600$ . Диафрагмы бывают двух основных типов: *камерные* (рис. 2.39а) и *бескамерные* (рис. 2.39б).

*Бескамерные диафрагмы* отличаются от камерных отсутствием кольцевых камер, а также наличием металлического ушка, приваренного к боковой поверхности диска.

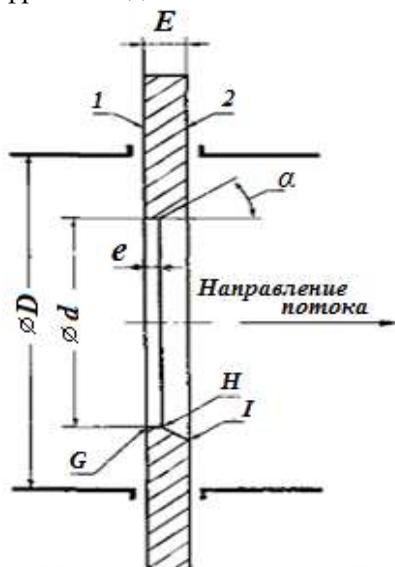
*Камерные диафрагмы* используются для трубопроводов с условным диаметром  $D_y$  от 50 до 500 мм, а бескамерные - от 300 до 1000 мм (рис. 2.40).



Рис. 2.40. Камерная диафрагма:  
диск, кольцевые камеры

Состоит из диска и корпусов кольцевых камер, служащих для замера статического давления.

Поперечное сечение в осевой плоскости *стандартной камерной диафрагмы* приведено на *рис. 2.41*. Толщина диафрагмы  $E$  не должна превышать  $0,05D$ , где  $D$  - диаметр трубопровода. Диаметр отверстия диафрагмы  $d$  должен быть больше  $12,5$  мм.



1 - входной торец диафрагмы 2 - выходной торец диафрагмы

Рис. 2.41. Стандартная диафрагма

Определение этого диаметра – сложная расчетная процедура, определяемая ГОСТом. Диафрагму можно изготавливать из любых материалов, при выборе которых следует учитывать свойства контролируемой среды. Разъединение (притупление) острой входной кромки резко изменяет коэффициент  $\varphi$ , измерения становятся неточными.

Как правило, диафрагма представляет собой тонкий диск, установленный в трубопроводе так, чтобы отверстие в диске было концентрично внутреннему контуру сечения трубопровода. Наиболее подходящие материалы – нержавеющие стали (например, 12X18H9T).

При измерении расхода газов и жидкостей допускается применять как угловой (рис. 2.42,а), так и фланцевый (рис. 2.42,б) способы отбора перепада давлений на диафрагмах.

Перепад давлений при фланцевом способе отбора следует измерять через отдельные цилиндрические отверстия.

Допустимые интервалы диаметров трубопроводов  $D$  и коэффициента  $\beta$  для диафрагм должны находиться в следующих пределах:  $50 \text{ мм} \leq D \leq 1000 \text{ мм}$ ; при  $0,1 \leq \beta \leq 0,75$ . В случае измерения расхода газа отношение абсолютных давлений на выходе из сужающего устройства и входе в него должно быть больше или равно 0,75.

Из условия неразрывности струи следует:

$$S_1 v_1 = S_0 v_0 = S_2 v_2, \quad (2.26)$$

где  $S_1$ ,  $S_0$ ,  $S_2$  – площади поперечного сечения соответственно трубопровода, отверстия диафрагмы и наиболее суженного места струи.

Отношение  $S_0/S_1 = \beta_2$  называется относительной площадью сужающего устройства (коэффициент  $\beta = d/D$  называется относительным диаметром отверстия сужающего устройства), а отношение  $S_2/S_0 = \mu$  – коэффициентом сужения потока.

С учетом этих коэффициентов значения скорости потока  $v_1$  и  $v_2$  через скорость  $v_0$  в отверстии диафрагмы площадью сечения  $S_0$  рассчитываются по формулам:

$$v_1 = v_0 \beta_2, \quad (2.27)$$

$$v_2 = v_0 \mu. \quad (2.28)$$

Произведение  $\alpha = CE$  называется коэффициентом расхода. Коэффициент расхода учитывает неравномерное распределение скоростей по сечению потока, обусловленное вязкостью жидкости и трением о стенки трубопровода, измерение давления не в центре потока, а у стенок трубопровода и введение в уравнение расхода сечения  $S_0$  вместо неопределенного наименьшего сечения струи  $S_2$ . Коэффициент расхода для сужающих устройств различных типов определяют опытным путем.

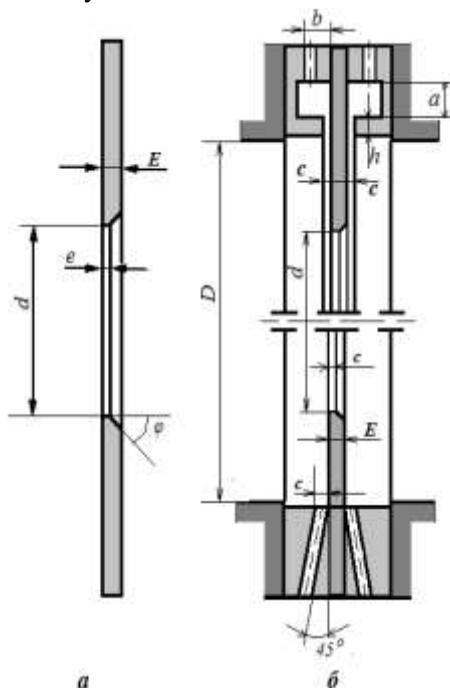


Рис. 2.42. Отбор давления:

а – диафрагма с фланцевым способом отбора давления;

б – диафрагма с угловым способом отбора давления

Заметим, что при выводе уравнений расхода делаются допущения, что жидкость несжимаема и плотность среды при ее течении через сужающее устройство не изменяется. Это допущение справедливо для несжимаемых сред. Для газов такое допущение может привести к значительной неопределенности результатов измерений. Поэтому при измерении расхода сжимаемых сред (газов и паров), особенно при больших перепадах давлений в сужающем устройстве, необходимо учитывать уменьшение плотности  $\rho$ , вызванное снижением давления при прохождении через сужающее устройство, поэтому массовый расход (а также объемный), отнесенный к начальному значению  $\rho$ , несколько уменьшится. Время прохождения газов и паров через сужающее устройство настолько незначительно, что их сжатие и последующее расширение происходят практически без обмена тепла с окружающей средой, то есть *адиабатически*. В этой связи необходимо отметить, что уравнения расхода для газов и паров в объемных и массовых долях действительны до тех пор, пока скорость потока в сужающем устройстве остается меньше критической, т. е. меньше скорости звука в данной среде. Уравнения расхода для газов и паров отличаются от уравнений расхода для несжимаемой жидкости только коэффициентом расширения  $\epsilon$ . Значения коэффициента расширения  $\epsilon$  для различных сужающих устройств и разных случаев измерения даны в справочниках и ГОСТах [43-47].

При измерении расхода горячего вещества ( $t \geq 100^\circ \text{C}$ ) необходимо обеспечить равенство температур в обеих соединительных линиях. Соединительные линии должны прокладываться таким образом, чтобы исключить в них скопление воздушных пузырьков (при измерении расхода жидкости) и конденсата (при измерении расхода газа или пара). Для этих целей на соединительных линиях рекомендуется устанавливать *газосборник* или отстойные сосуды. При измерении расхода агрессивных сред передача измеряемого давления должна осуществляться через разделительную жидкость, заливаемую в *дифманометр*. Жидкость служит для защиты внутренних

полостей *дифманометров* от воздействия измеряемой среды. В этом случае на участках соединительных линий между дифманометром и сужающим устройством подключают разделительные сосуды.

### 2.3.4. Стандартные сужающие устройства

Для всех *стандартных сужающих устройств* коэффициенты расхода в широком диапазоне достаточно достоверны и воспроизводимы, поэтому указанные устройства можно применять без индивидуальной градуировки.

К стандартным (нормализованным) сужающим устройствам относятся диафрагмы (ГОСТ 8.586.2-2005), *сопла* и *сопла Вентури* (ГОСТ 8.586.3-2005), а также *трубы Вентури* (ГОСТ 8.586.4-2005).

*Стандартное сопло* (рис. 2.43) – тип стандартного сужающего устройства, имеющего плавно сужающуюся часть на входе, переходящую на выходе в горловину. Сопла могут применяться без индивидуальной градуировки в трубопроводах  $50 \text{ мм} \leq D \leq 630 \text{ мм}$ , при условии, что  $0,2 \leq \beta \leq 0,65$ .

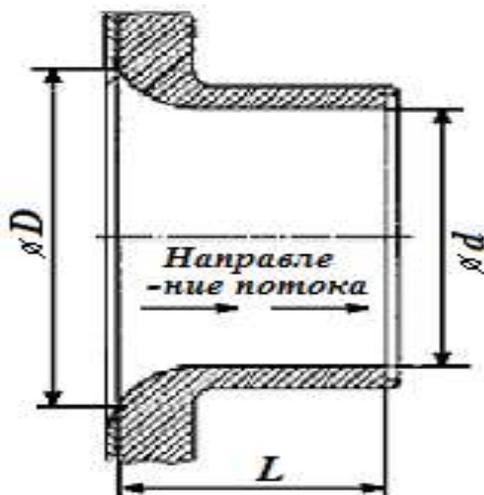


Рис. 2.43. Стандартное сопло

Сопло особенно удобно для измерения расхода газов и перегретого пара, если  $((P_1 - P_2)/P_1) < 0,1$ , а также для измерения расхода пара высокого давления и агрессивных газов в трубопроводах диаметром  $D \leq 200$  мм.

По сравнению с диафрагмами они менее чувствительны к коррозии, загрязнениям и обеспечивают несколько большую точность измерения.

Профильная часть отверстия сопла должна быть выполнена с плавным сопряжением дуг. Поверхность входной части сопла не должна быть шероховатой; для цилиндрической части исключается конусность. Выходная кромка цилиндрической части отверстия должна быть острой, без заусенцев, фаски или закругления. Для изготовления сопел обычно применяют те же материалы, что и для диафрагм.

### ***Сопла и трубы Вентури***

Что касается *сопл* и *труб Вентури*, то измерение расхода осуществляется по методу переменного перепада давлений. Протекающее вещество должно полностью заполнять все сечение трубопровода и сужающего устройства; поток в трубопроводе должен быть практически установившимся; фазовое состояние веществ не должно изменяться при прохождении их через сужающее устройство (жидкость не должна испаряться, пар должен оставаться перегретым и т. п.).

Сужение потока (рис. 2.44, б) начинается до диафрагмы (область  $A_1$ ); затем на некотором расстоянии непосредственно перед диафрагмой благодаря действию сил инерции поток сужается до минимального сечения, а далее постепенно расширяется до полного сечения трубопровода (область  $A_2$ ). Перед диафрагмой и за ней образуются зоны с вихревым движением, причем зона вихрей за диафрагмой больше, чем перед ней.

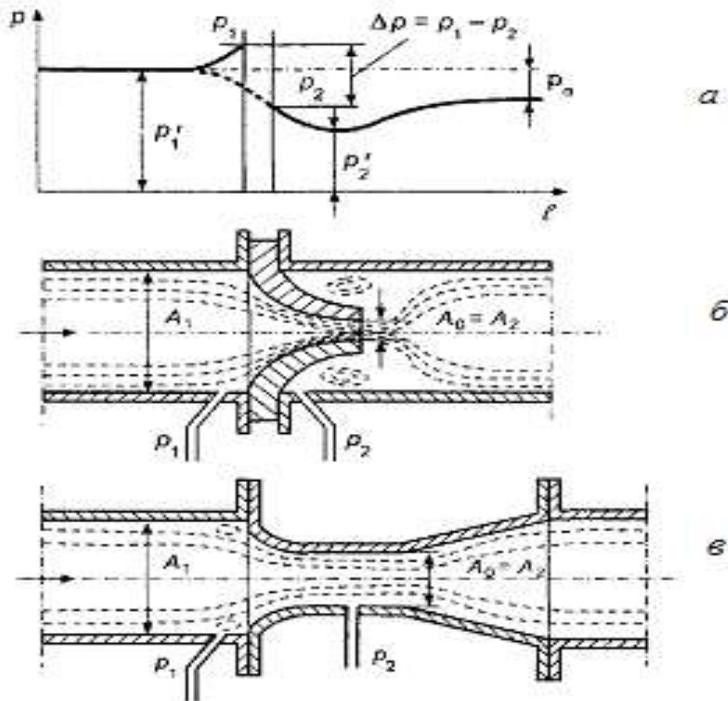


Рис. 2.44. Вид потока и изменение давления при прохождении потока через сужающее устройство

Давление потока около стенки трубопровода несколько возрастает до величины  $P_1$  из-за подпора перед диафрагмой и снижается до минимального значения  $P_2'$  за диафрагмой в наиболее узком сечении потока (рис. 2.44,а). Далее, по мере расширения струи, давление потока около стенки снова повышается, но не достигает прежнего значения. Потеря части давления  $P_n$  определяется, главным образом, потерей энергии на трение и завихрения.

Изменение давления потока по оси трубопровода практически совпадает с изменением давления около его стенки, за исключением участка перед диафрагмой и непосредственно в ней, где давление потока по оси трубы снижается (штриховая линия).

Разность давлений ( $P'-P_2'$ ) является перепадом, зависящим от расхода протекающей через трубопровод среды. По конструктивным соображениям и ввиду невозможности практического определения зоны для измерения  $P_2'$  в расчет принимается перепад давления ( $P_1-P_2$ ), т. е. непосредственно около стенок трубопровода до и после сужающего устройства.

Компенсация разницы между ( $P'-P_2'$ ) и ( $P_1-P_2$ ) достигается введением поправочных коэффициентов.

Теория и основные уравнения метода переменного перепада давлений одинаковы для сужающих устройств всех видов, различаются лишь некоторые коэффициенты в уравнениях, определяемые опытным путем.

Выведем уравнение расхода для случая, когда в трубопроводе установлена диафрагма, и по трубопроводу протекает несжимаемая жидкость, плотность которой  $\rho$  до и после сужения остается неизменной.

Стандартное сопло Вентури (рис. 2.45) - сопло, которое состоит из входной части в виде сопла, горловины и выходной части в виде расходящегося конуса (диффузора).

Они могут применяться без индивидуальной градуировки для диаметров трубопроводов  $65 \text{ мм} \leq D \leq 500 \text{ мм}$ , при  $0,316 \leq \beta \leq 0,775$  и при  $d \geq 50 \text{ мм}$ .

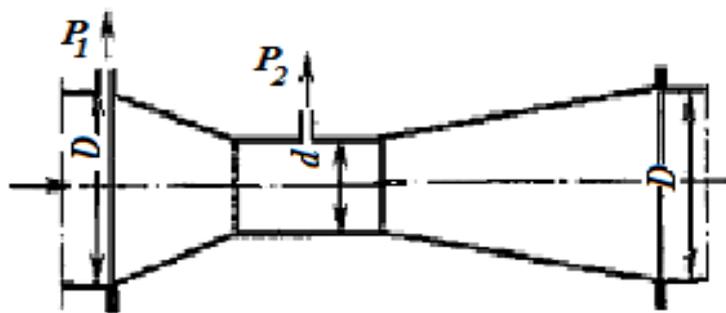


Рис. 2.45. Сопло Вентури

*Сопло Вентури* состоит из профильной входной части, цилиндрической средней части и выходного конуса. *Сопло Вентури* может быть длинным и коротким: у первого наибольший диаметр выходного конуса равен диаметру трубопровода, у второго – меньше. Перепад давлений следует измерять через кольцевые камеры. Стандартные *трубы Вентури* можно применять в трубопроводах диаметром от 50 до 1200 мм при условии, что  $0,3 \leq \beta \leq 0,75$ .

*Труба Вентури* (рис. 2.46) называется длинной, если наибольший диаметр выходного конуса равен диаметру трубопровода, или короткой, если указанный диаметр меньше диаметра трубопровода.

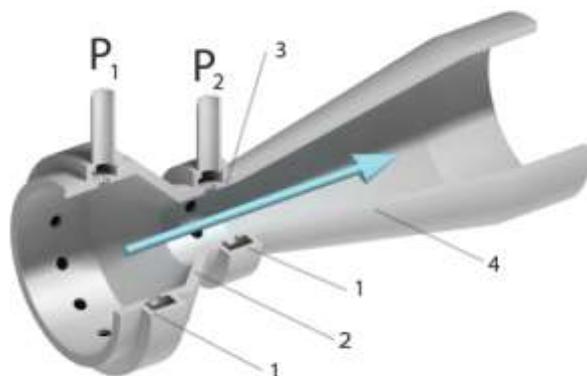


Рис. 2.46. Труба Вентури:

1 – измерительные участки; 2 – сужение трубы; 3,4 – линии соединения

Давления в горловине и входном патрубке следует отбирать через отверстия в стенках и через усредняющие камеры.

К преимуществам *труб Вентури* следует отнести меньшую потерю давления по сравнению с потерями в сужающих устройствах других типов.

### 2.3.5. Комплектация расходомера

Расходомер переменного перепада давления (рис. 2.47) состоит из следующих основных частей: измерительных участков трубопровода 1 до и после сужающего устройства, сужающего устройства 2, линий соединения измерительных участков трубопровода с дифференциальным манометром 3, 4.

Требования к исполнению монтажа измерительных участков трубопровода изложены в ГОСТ 8.586.1-5-2005. В них устанавливаются требования к выполнению *расходомерных устройств* при их разработке, проектировании, монтаже, эксплуатации и поверке.

*Расходомерные дифманометры* обычно устанавливают совместно с диафрагмами, перепад давления на которых однозначно связан с расходом среды.

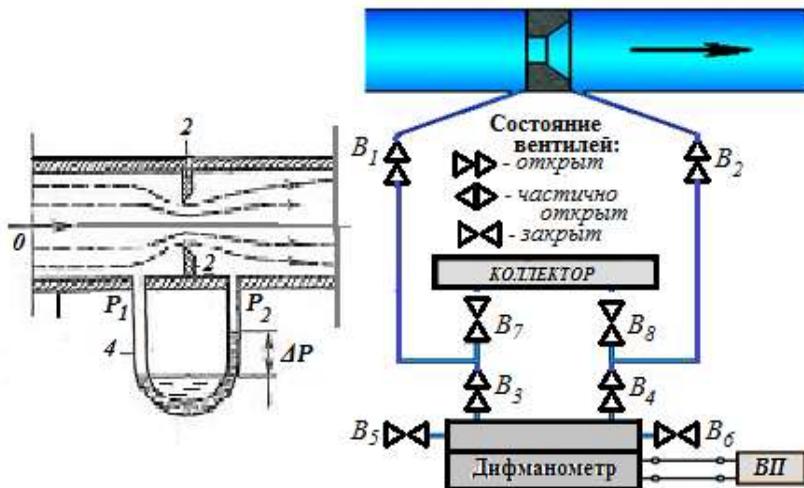


Рис. 2.47. Комплектация расходомера переменного перепада давления. Участок трубопровода: 2 – сужающее устройство; 4 – дифференциальный манометр

Заполнение *дифманометра* уравнивающей жидкостью, его монтаж и подключение к соединительным линиям для измерения перепада давлений на сужающем устройстве следует производить в соответствии с руководством по монтажу и эксплуатации прибора.

Выбор *дифманометра* по параметрам окружающей среды и его применения для заданных рабочих условий измерения расхода должны соответствовать требованиям технической документации завода-изготовителя.

Допускается подключение к одному *сужающему устройству* двух и более *дифманометров*; при применении интегрирующих *дифманометров* одновременная их работа не допускается. Допускается подключение соединительных линий одного *дифманометра* к соединительным линиям другого *дифманометра* и подключение манометра к «плюсовой» импульсной линии *дифманометра*, если это не оказывает влияния на процесс измерения. Соединительные линии для подключения элементов телемеханики должны быть проложены отдельно от других соединительных линий по кратчайшему расстоянию вертикально или с уклоном к горизонтали не менее 1:10. Длина линий не должна превышать наибольшей допустимой длины, указанной в руководстве по монтажу и эксплуатации *дифманометра*. Соединительные линии должны быть защищены от действия внешних источников тепла или холода.

### **2.3.6. Расходомеры постоянного перепада давления**

Наибольшее распространение среди расходомеров постоянно го перепада давления получили *ротаметры*.

Наиболее распространенными приборами этой группы являются расходомеры со свободно перемещающимся в корпусе поплавком (*ротаметры*). Принципиальная схема ротаметра показана на *рис. 2.48*.

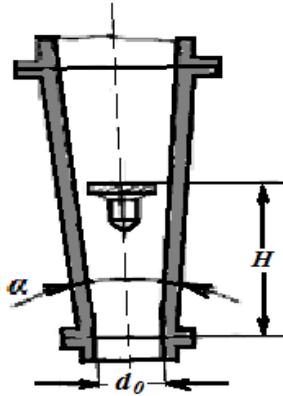


Рис. 2.48. Принципиальная схема ротаметра

Проходящий через *ротаметр* снизу поток жидкости или газа поднимает поплавок вверх до тех пор, пока расширяющаяся кольцевая щель между телом поплавка и стенками конусной трубки не достигнет такой величины, при которой действующие на поплавок силы уравниваются, и он останавливается на той или иной высоте, в зависимости от величины расхода. При неизменном расходе поплавок неподвижен.

В работающем ротаметре поплавок полностью погружен в измеряемую среду. Вес погруженного поплавка  $G_1$  определяется уравнением:

$$G_1 = V_n g (\rho_n - \rho_c), \quad (2.29)$$

где  $V_n$  - объем поплавка;  $\rho_n$  и  $\rho_c$  - плотности материала поплавка и измеряемой среды соответственно;  $g$  - ускорение свободного падения.

Сила  $G_2$ , действующая на поплавок со стороны измеряемого потока, равна

$$G_2 = (P_1 - P_2) F_o, \quad (2.30)$$

где  $P_1$ , и  $P_2$  - давления среды перед поплавком и за ним;  $F_o$  – наибольшее поперечное сечение поплавка.

В состоянии равновесия (поплавок неподвижен)  $G_1 = G_2$ , т. е.

$$V_n g(\rho_n - \rho_c) = (P_1 - P_2) F_o \quad (2.31)$$

или

$$P_1 - P_2 = V_n g(\rho_n - \rho_c) / F_o \quad (2.32)$$

Из полученного уравнения видно, что независимо от положения поплавка перепад давлений на нем постоянен и не зависит от измеряемого расхода. Это объясняется постоянством скорости измеряемой среды при изменении ее расхода, что обусловлено изменением площади кольцевого зазора между поплавком и трубкой.

Уравнение для объемного расхода можно представить в виде:

$$Q = \alpha S_K, \quad (2.33)$$

где  $\alpha$  - коэффициент расхода, учитывающий особенности потока;  $S_K$  - площадь кольцевого зазора между трубкой и боковой поверхностью поплавка.

Так как величины в уравнении (2.33) практически постоянны, то мы имеем линейную зависимость, и поэтому шкала ротаметра является равномерной.

*Ротаметр* может быть оборудован электрической дифференциально-трансформаторной системой передачи показаний (рис. 2.49). Трубка 1 данных ротаметров оборудована диафрагмой 2, внутри которой перемещается конусный поплавок 3. Поплавок соединен со штоком 4, на противоположном конце которого располагается сердечник 5 дифференциально-трансформаторного преобразователя. При перемещении поплавка меняется положение сердечника, что приводит к изменению напряжения на катушках 7 преобразователя. Изменение напряжения преобразуется в цифровой сигнал во вторичном преобразователе и выводится на дисплей *ротаметра*.

*Ротаметры* измеряют расход при рабочих давлениях до 6,2 МПа с погрешностью измерения, не превышающей 3 % верхнего предела измерений.

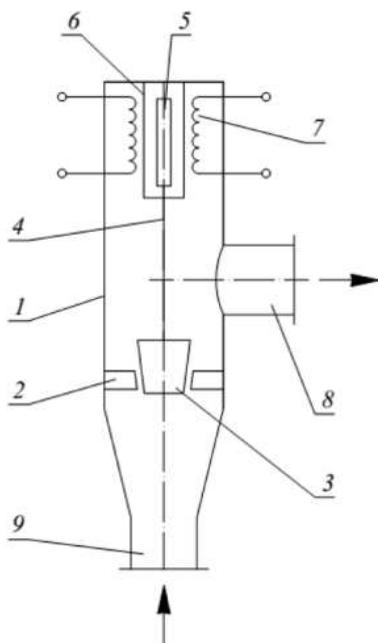


Рис. 2.49. Ротаметр, оборудованный электрической системой передачи показаний:

- 1 – трубка; 2 – диафрагма; 3 – поплавок; 4 – шток; 5 – сердечник;  
 6 – разделительная трубка; 7 – катушки; 8 – выходной патрубков;  
 9 – входной патрубков

Измерительная часть прибора изготовлена в виде металлического цилиндра 1, в который помещена диафрагма 2. Внутри диафрагмы перемещается конусный поплавок 3, жестко соединенный со штоком 4, на верхнем конце штока укреплен сердечник 5 дифференциально-трансформаторного преобразователя. Сердечник находится внутри разделительной трубки 6, на которую надета катушка преобразователя.

Ротаметры выполняют со стеклянной или металлической трубкой.

На рис. 2.50 показаны типичные ротаметры со стеклянной конической трубкой 1, закрепленной в двух металлических головках 2

и 3, снабженных сальниками и фланцами для включения в вертикальный участок трубопровода.

Головки стянуты одна с другой несколькими тягами 4, образующими вместе с поперечинами 5 защитную решетку вокруг стеклянной трубки. Внутри трубки свободно перемещается поплавок 6, имеющий форму волчка. В нижней головке находится седло, на которое опускается поплавок при прекращении потока. Верхняя головка снабжена ограничителем хода поплавка. Седло и ограничитель хода не позволяют поплавку выйти за пределы стеклянной трубки. Шкала 7 прибора может быть вытравлена на самой стеклянной трубке.

Отсчет ведут по верхней горизонтальной плоскости поплавка. В верхней части поплавка часто делают косые прорезы, которые позволяют поплавку вращаться вокруг вертикальной оси. При вращении поплавок центрируется внутри трубки, не соприкасаясь со стенками, его чувствительность повышается.

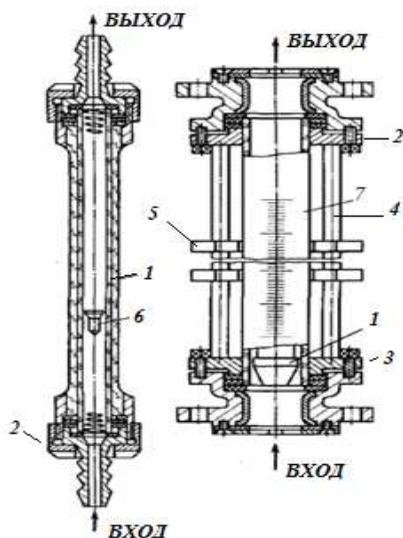


Рис. 2.50. Типы стеклянных ротаметров:

- 1 – полая стеклянная трубка; 2, 3 – крепежные металлические головки;  
4 – продольные тяги; 5 – поперечины; 6 – поплавок; 7 – шкала

Ротаметры со стеклянной трубкой изготавливают на давление, не превышающее 600 КПа (рис. 2.51).



Рис. 2.51. Примеры типовых стеклянных ротаметров

При более высоком давлении измеряемой среды, а также для измерения расхода пара применяют ротаметры с металлической трубкой и с электрической дифференциально-трансформаторной системой передачи показаний на расстояние. Такие ротаметры являются бесшкальными и создаются в комплекте с вторичными дифференциально-трансформаторными приборами [39; 40].

### 2.3.7. Электромагнитные расходомеры

*Расходомеры* данного типа относятся к бесконтактным, т. е. в них отсутствует прямой контакт измеряемой среды с узлами прибора. Эти расходомеры подразделяются на приборы с электромагнитным преобразователем расхода и приборы с электромагнитными преобразователями скорости потока [41; 42].

Приборы с электромагнитным преобразователем расхода основаны на взаимодействии движущейся жидкости с магнитным полем. Это взаимодействие подчиняется закону Фарадея, согласно которому в жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения жидкости [48; 50].

Принципиальная схема *электромагнитного расходомера* показана на *рис. 2.52*. Трубопровод *1* с перемещающейся в нем электропроводной жидкостью помещен в магнитное поле, создаваемое двумя катушками индуктивности (индукторами) *2*.

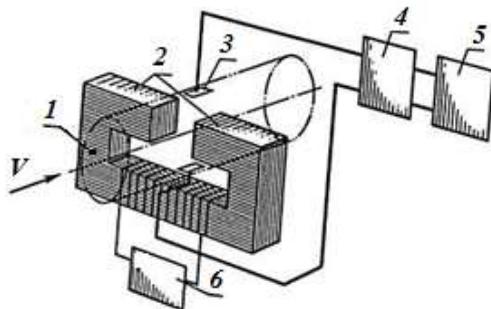


Рис. 2.52. Электромагнитный расходомер:  
 1 – трубопровод; 2 – полюсы магнита; 3 – электроды для съема ЭДС.;  
 4 – электронный усилитель; 5 – отсчетная система;  
 6 – блок питания магнита

В стенки трубопровода диаметрально противоположно в одном поперечном сечении введены электроды *3* (заподлицо с внутренним диаметром трубы). К электродам подключают какой-либо высокочувствительный измерительный прибор *4*, шкала которого градуирована в единицах скорости или единицах расхода.

Трубопровод изготавливают из изоляционного материала, для этой цели используют фторопласт, эбонит, резину и другие материалы в зависимости от свойств измеряемой жидкости.

Известно, что в движущемся проводнике, пересекающем силовые линии постоянного магнитного поля, индуцируется электродвижущая сила, величина которой определяется по формуле:

$$E = B \cdot l \cdot v, \quad (2.34)$$

где  $E$  – индуцируемая в проводнике ЭДС;  $B$  – магнитная индукция;  $l$  – длина проводника;  $v$  – скорость движения проводника.

В случае измерения расхода жидкости можно записать

$$E = B \cdot D \cdot v_{cp}, \quad (2.35)$$

где  $D$  – внутренний диаметр трубопровода;  $v_{cp}$  – средняя скорость протекания жидкости через поперечное сечение трубы в зоне индуцируемой ЭДС.

Выразив скорость через объемный расход  $Q$  (2.24), получим (для трубопровода круглого сечения)

$$E = (B \cdot D) \cdot Q/S. \quad (2.36)$$

Из этой формулы следует, что при однородном магнитном поле ЭДС прямо пропорциональна объемному расходу.

Следовательно, *электромагнитный расходомер* является по существу генератором, в котором проводником, перемещающимся в магнитное поле, служит электропроводная жидкость. Проводимость жидкости должна быть не ниже  $10^{-5}$ - $10^{-6} \text{ } \Omega^{-1}$ , что соответствует проводимости водопроводной воды.

Существенные и основные недостатки *электромагнитных расходомеров* с постоянным магнитным полем: возникновение на электродах гальванической ЭДС и ЭДС поляризации затрудняют или делают невозможным правильное измерение ЭДС, индуцируемой магнитным полем в движущейся жидкости. Другим недостатком расходомеров с постоянным магнитным полем является трудность усиления напряжения постоянного тока. В связи с этим расходомеры с постоянным магнитным полем применяют лишь при измерении расхода жидких металлов, пульсирующих потоков жидкости и при кратковременных измерениях, когда поляризация не успевает оказать заметного влияния.

В настоящее время в подавляющем большинстве *электромагнитных расходомеров* применяют переменное магнитное поле. Если магнитное поле изменяется во времени  $t$  с частотой  $f$ , то для трубопроводов круглого сечения ЭДС равна:

$$E = (B_{max} \cdot \sin \omega t) \cdot 4Q/\pi D, \quad (2.37)$$

где  $B_{max}$  – амплитудное значение магнитной индукции;  $\omega = 2\pi f$  – круговая частота.

При переменном магнитном поле электрохимические процессы оказывают меньшее влияние, чем при постоянном.

В современных *электромагнитных расходомерах* для усиления сигнала, снимаемого с преобразователя, используют электронный усилитель с большим входным сопротивлением. При этом условия в большинстве случаев изменение сопротивления преобразователя при изменении параметров контролируемой среды не сказывается на показаниях. Это важное преимущество *электромагнитных расходомеров*.

В *расходомерах* с переменным магнитным полем возникают помехи как в преобразователе, так и вне его. В основном на погрешность измерения влияют помехи: паразитные от внешних цепей; емкостные от переменного тока, питающего электромагнит; индукционные («трансформаторные») от магнитного поля преобразователя. Помехи удается устранить экранированием прибора.

Для исключения трансформаторной ЭДС используют различные способы. Один из способов заключается в применении двух индукционных преобразователей (с самостоятельными магнитами), включенных таким образом, что магнитные поля в них направлены в противоположные стороны. Дополнительные ЭДС взаимной индукции при этом (как равные по величине и по фазе, но противоположные по направлению) взаимно уничтожаются в первичной обмотке выходного трансформатора.

Комплект общепромышленного *электромагнитного расходомера (ЭМР)* состоит из преобразователя расхода и измерительного блока. Конструктивно преобразователь включает два узла: трубу и электромагнит. Преобразователь содержит также контур для подавления трансформаторной ЭДС.

*Электромагнитные расходомеры* имеют ряд преимуществ. Прежде всего, они практически безынерционны, что очень важно при измерении быстроизменяющихся расходов и при использовании их в системах автоматического регулирования. Результат измерения не зависит от наличия взвешенных частиц в жидкости и пузырьков газа.

Измерения в достаточной степени независимы от профиля потока и таких свойств среды, как давление, температура, вязкость, плотность, состав, электропроводность и загрязнение электродов. В *расходомере* отсутствуют потери давления, отсутствуют движущиеся части.

Вследствие линейной зависимости возникающей ЭДС от расхода шкала вторичного прибора линейна. *Электромагнитные расходомеры* обеспечивают измерение расхода в интервале  $0,002-300000 \text{ м}^3/\text{ч}$  и более при трубопроводах с внутренним диаметром от 3 до 3000 мм.

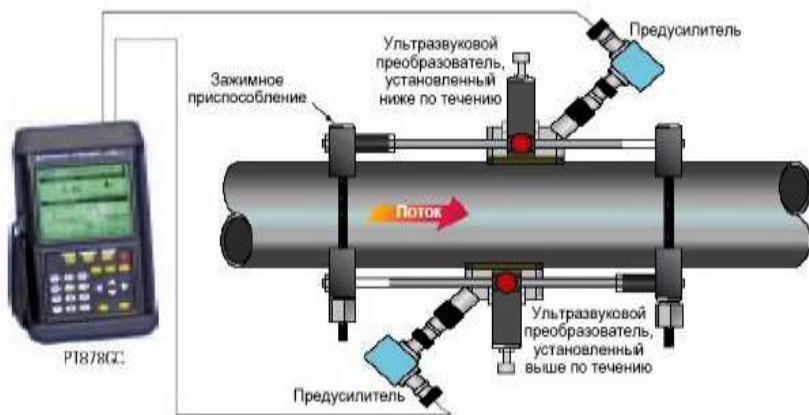
### 2.3.8. Ультразвуковые расходомеры [51-54]

Ультразвуковой (частота выше  $20 \text{ КГц}$ ) метод измерения расхода основан на явлении смещения звукового колебания движущейся жидкой или газообразной средой. Измерение расхода в основном осуществляется путем косвенных измерений следующих величин:

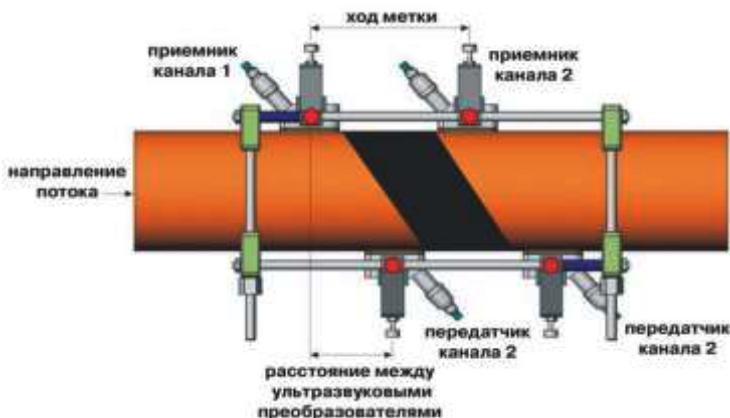
- разности времен  $\Delta t$  (временимпульсный метод) прохождения ультразвуковых импульсов по потоку и против него;
- разности фаз  $\Delta \varphi$  (фазовый метод) между ультразвуковыми колебаниями, распространяющимися по потоку и против него;
- разности частот  $\Delta f$  (частотный метод) двух автогенераторов, в качестве элемента обратной связи которых используется контролируемая среда.

Современные *расходомеры*, как правило, реализуют временимпульсный метод. На *рис. 2.53* представлена принципиальная схема измерения расхода *ультразвуковым расходомером*, использующим временимпульсный метод.

Расходомер включает в себя два (*рис. 2.53а*) или четыре (*рис. 2.53б*) электроакустических приемопередающих преобразователя  $A, A'$  и  $B, B'$ , монтируемых с внешней стороны трубопровода. Преобразователи работают как в режиме источника ультразвукового сигнала, так и в режиме приемника. Расстояние между преобразователями равно  $L$ .



а)



б)

Рис. 2.53. Схема измерения ультразвуковым расходомером:  
а – с двумя преобразователями; б – с четырьмя преобразователями

Если ультразвуковые колебания распространяются по направлению скорости потока  $v$ , то они проходят расстояние  $L$  за время

$$t_{AB} = L/(c + v) = L/c(1 + v/c), \quad (2.38)$$

где  $c$  - скорость звука в данной среде.

При распространении колебаний против скорости потока

$$t_{BA} = L/(c - v) = L/c(1 - v/c). \quad (2.39)$$

Отношение  $v/c$  весьма мало по сравнению с единицей (для жидкостей  $c \approx 1000-1500$  м/сек,  $v \approx 3-4$  м/сек), поэтому с большой степенью точности можно принять:

$$t_{AB} = L/(c + v) = L/c(1 + \beta), \quad (2.40)$$

$$t_{BA} = L/(c - v) = L/c(1 - \beta), \quad (2.41)$$

где  $\beta = v/c$ .

В *ультразвуковых расходомерах* фиксируется разность времени

$$\Delta t = t_{BA} - t_{AB}. \quad (2.42)$$

Из уравнений (2.40) и (2.41):

$$\Delta t = t_{BA} - t_{AB} = 2Lv/c^2. \quad (2.43)$$

Эта разность времен прохождения импульсов по потоку и против потока является мерой расхода.

*Ультразвуковые расходомеры* предназначены для измерения расхода почти всех продуктов, будь то жидкости или газы, агрессивные или коррозионные. Единственным условием является отсутствие в потоке большого количества твердых и газовых включений.

Измерение не зависит от электропроводности, вязкости, температуры, плотности и давления среды. Полнопроходное сечение исключает накопление отложений, потери давления и износ.

*Ультразвуковые расходомеры* изготавливают на рабочее давление 6,2 МПа. Основная погрешность комплекта (преобразователя и вторичного прибора) составляет 3 % от верхнего предела измерения.

### 2.3.9. Расходомеры Кориолиса [55-58]

Большинство *расходомеров Кориолиса* снабжены изогнутыми трубками, которые имеют разнообразную конструкцию. Однако некоторые производители разработали *счетчики Кориолиса* с прямыми трубками. Расходомеры с прямыми трубками работают по тому же принципу, что и расходомеры, на которых установлены изогнутые трубки. В первой половине счетчика жидкость разгоняется под воздействием собственной инерции, а затем снижает скорость в его второй половине.

Жидкости, протекающей через трубу, придается вертикальная составляющая движения вибрирующей трубки. При движении трубки вверх во время первой половины цикла колебания (рис. 2.54, 55, 56) жидкость, втекающая в трубку, создает сопротивление движению вверх, давя на трубку вниз.

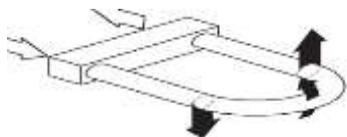


Рис. 2.54. Силы, действующие на трубку при движении вверх

*Расходомеры Кориолиса* получили свое название по фамилии французского математика Густава Кориолиса. В 1835 г. Кориолис показал, что силу инерции следует учитывать при описании движения тел во вращающейся системе координат. Землю часто приводят в качестве примера силы, открытой Кориолисом. Поскольку Земля постоянно вращается, предмет, брошенный с Северного или Южного полюса по направлению к экватору, скорее всего, отклонится от намеченной траектории.

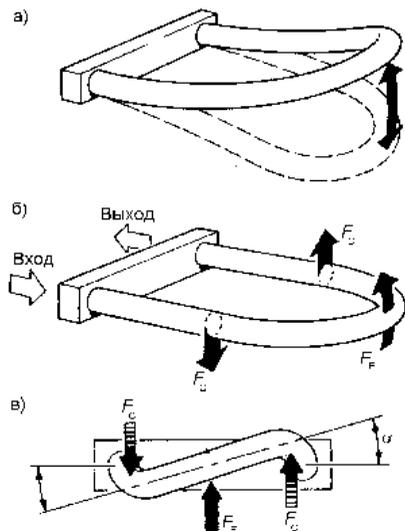


Рис. 2.55. Направление движения трубок

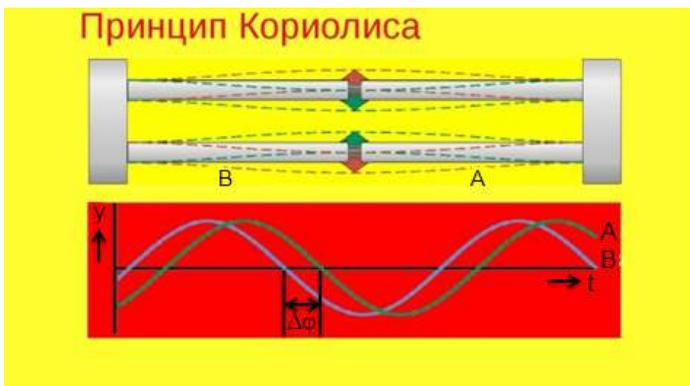


Рис. 2.56. Сигналы, поступающие с детекторов:  
 А – при отсутствии расхода; В – при наличии расхода

Поглотив вертикальный импульс при движении вокруг изгиба трубки, жидкость, вытекающая из нее, сопротивляется уменьшению вертикальной составляющей движения, толкая трубку вверх (рис. 2.54). Это приводит к закручиванию трубки.

Когда трубка движется вниз во время второй половины цикла колебания, она закручивается в противоположную сторону. В этом закручивании и проявляется *эффект Кориолиса*.

Исходя из второго закона Ньютона, угол закручивания трубки прямо пропорционален количеству жидкости, проходящей через трубку в единицу времени (рис. 2.57).

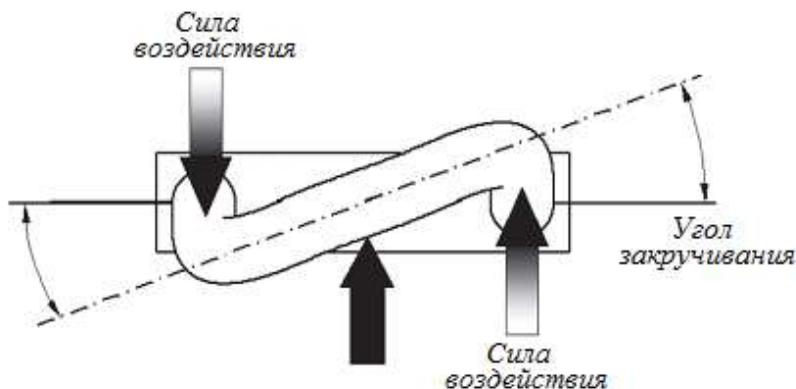


Рис. 2.57. Трубка сенсора и пара сил, приводящая ее к закручиванию

Основой *расходомера* является сенсор (рис. 2.58), который состоит из одной или двух измерительных (сенсорных) трубок 1, имеющих изогнутую форму (на рис. 2.58 показан сенсор с двумя U-образными трубками), которые приварены к участку трубопровода с фланцами.

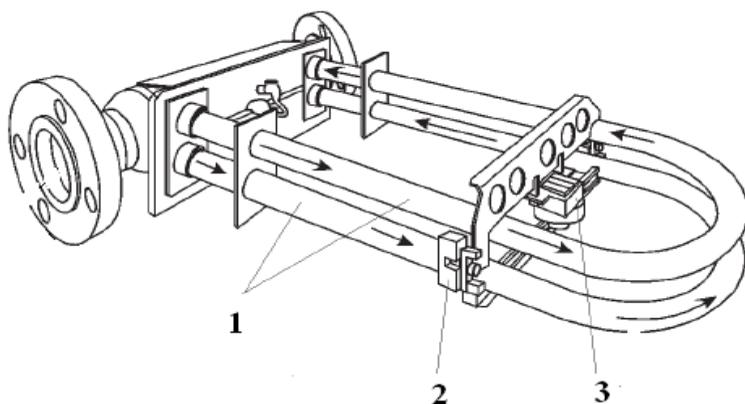


Рис. 2.58. Расходомер Кориолиса:

1 – сенсорные трубки; 2 – детекторы скорости; 3 – задающая катушка

Между трубками на специальном креплении расположена задающая катушка 3, создающая колебания трубок. По бокам трубок на входе и выходе установлены детекторы 2, определяющие положение трубок друг относительно друга. Измеряемая среда, поступающая в сенсор, разделяется на равные половины, протекающие через каждую из измерительных трубок.

Работа задающей катушки приводит к тому, что трубки колеблются вверх-вниз в противоположном направлении друг к другу. Колебания трубок подобны колебаниям камертона и имеют амплитуду менее 1 мм и частоту около 100 Гц.

Сборки магнитов и катушек соленоидов, называемых детекторами, установлены на измерительных трубках. Катушки смонтированы на одной трубке, магниты - на другой. В каждой трубке жидкость движется сквозь однородное магнитное поле постоянного магнита. Сгенерированное на детекторах напряжение имеет форму синусоидальной волны. Сигналы с детекторов характеризуют дви-

жение одной трубки относительно другой. Эти сигналы имеют фазовый сдвиг при движении противоположных сторон сенсорной трубки.

Когда расход отсутствует, синусоидальные сигналы, поступающие с детекторов, находятся в одной фазе. При наличии расхода как результат изгиба трубок генерируемые детекторами сигналы не совпадают по фазе, т. к. сигнал от входной стороны запаздывает по отношению к сигналу с выходной стороны. Разница во времени между сигналами ( $\Delta T$ ) измеряется в микросекундах и прямо пропорциональна массовому расходу. Чем больше  $\Delta T$ , тем больше массовый расход.

Инерция жидкости создает *силу Кориолиса*, которая незначительно искривляет измерительную трубку. Степень искривления пропорциональна массовому расходу. Для определения степени искривления используются сенсоры. Температура трубки постоянно измеряется, поскольку ее колебательные свойства изменяются в зависимости от температурных изменений. Благодаря этому в измерениях удается внести любые требуемые поправки.

*Расходомеры Кориолиса* могут применяться для измерения расхода как жидкостей, так и газов с диаметром труб от 3 до 150 мм. Класс точности от 0,5 до 1,5.

### **2.3.10. Вихревые и вихреакустические расходомеры [59; 60; 61]**

Принцип действия этих *расходомеров* основан на явлении, носящем название «*эффект Ван Кармана*», согласно которому при обтекании неподвижного твердого тела потоком жидкости за телом образуется вихревая дорожка, состоящая из вихрей, попеременно срывающихся с противоположных сторон тела.

На *рис. 2.59* показано обтекание цилиндра потоком и образование вихрей. Частота образования вихрей за телом пропорциональна скорости потока. Детектирование вихрей и определение частоты их образования позволяет определить скорость и объемный расход среды.

В зависимости от способа детектирования частоты вихрей различают *вихревые* и *вихреакустические расходомеры*.

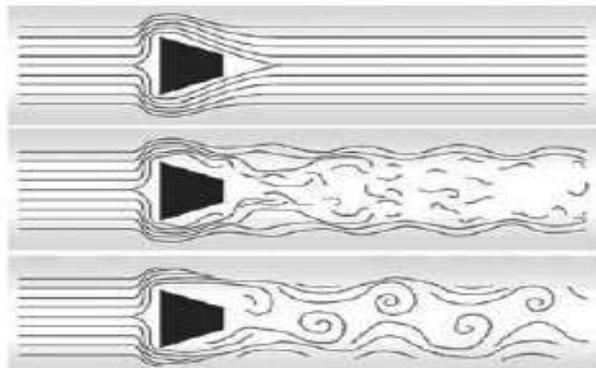


Рис. 2.59. Образование вихрей

В *вихревых расходомерах* определение частоты вихреобразования производится при помощи двух пьезодатчиков, фиксирующих пульсации давления в зоне вихреобразования («съем сигнала по пульсациям давления»).

Конструктивно датчик представляет собой моноблок, состоящий из корпуса проточной части и электронного блока. В корпусе проточной части датчика размещены первичные преобразователи объемного расхода, избыточного давления и температуры (рис. 2.60).

Электронный блок представляет собой плату цифровой обработки сигналов первичных преобразователей, заключенную в корпус. На входе в проточную часть датчика установлено тело обтекания 1. За телом обтекания, по направлению потока газа, симметрично расположены два пьезоэлектрических преобразователя пульсаций давления 2.

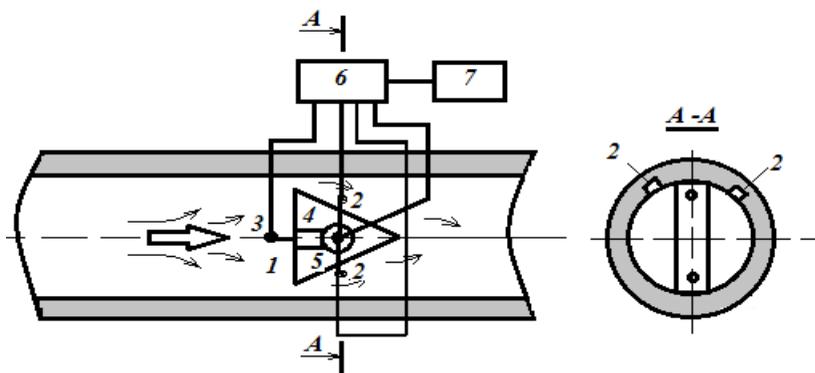


Рис. 2.60. Вихревой расходомер:

- 1 – тело обтекания; 2 – преобразователи пульсаций давления;
- 3 – датчик избыточного давления; 4 – термопреобразователь;
- 5 – отверстия; 6 – плата цифровой обработки; 7 – вычислитель

При протекании потока газа (пара) через проточную часть датчика за телом обтекания образуется вихревая дорожка, частота следования вихрей в которой с высокой точностью пропорциональна скорости потока, а следовательно, и расходу. В свою очередь, вихреобразование приводит к появлению за телом обтекания пульсаций давления среды. Частота пульсаций давления идентична частоте вихреобразования и в данном случае служит мерой расхода. Пульсации давления воспринимаются пьезоэлектрическими преобразователями, сигналы с которых в форме электрических колебаний поступают на плату цифровой обработки, где происходит вычисление объемного расхода и объема газа при рабочих условиях и формирование выходных сигналов по данным параметрам в виде цифрового кода.

Преобразователь избыточного давления 3 тензорезистивного принципа действия размещен перед телом обтекания вблизи места его крепления. Он осуществляет преобразование значения избыточного давления потока в трубопроводе в электрический сигнал, который с выхода мостовой схемы преобразователя поступает на плату цифровой обработки.

*Термопреобразователь сопротивления платиновый (ТСП) 4* размещен внутри тела обтекания. Для обеспечения непосредственного контакта *ТСП* со средой в теле обтекания выполнены отверстия 5. Электрический сигнал *термопреобразователя* также подвергается цифровой обработке.

Плата цифровой обработки 6, содержащая два микропроцессора, производит обработку сигналов преобразователей пульсаций давления, избыточного давления и температуры, в ходе которой обеспечивается фильтрация паразитных составляющих, обусловленных влиянием вибрации, флуктуаций давления и температуры потока, и происходит формирование выходных сигналов многопараметрического датчика по расходу, объему при рабочих условиях, давлению и температуре в виде цифрового кода. Выходные сигналы передаются на вычислитель 7.

В *вихреакустических расходомерах* (рис. 2.61) в качестве тела обтекания применяется призма трапецеидального сечения, а детектирование вихрей производится с помощью ультразвуковых преобразователей.

*Расходомер* состоит из проточной части и электронного блока. В корпусе проточной части расположены тело обтекания – призма трапецеидальной формы 1, пьезоизлучатели (*ПИ*) 2, пьезоприемники (*ПП*) 3 и термодатчик 7.

Электронный блок включает в себя генератор 4, фазовый детектор 5, микропроцессорный фильтр с блоком формирования выходных сигналов 6.

Тело обтекания расположено на входе жидкости в проточную часть. При обтекании этого тела потоком жидкости за ним образуется вихревая дорожка, частота следования вихрей в которой с высокой точностью пропорциональна расходу.

За телом обтекания в корпусе проточной части расположены диаметрально противоположно друг другу стаканчики, в которых собраны ультразвуковой пьезоизлучатель *ПИ* и пьезоприемник *ПП*.

На *III* от генератора подается переменное напряжение, которое преобразуется в ультразвуковые колебания. Пройдя через поток, эти колебания в результате взаимодействия с вихрями оказываются модулированными по фазе.

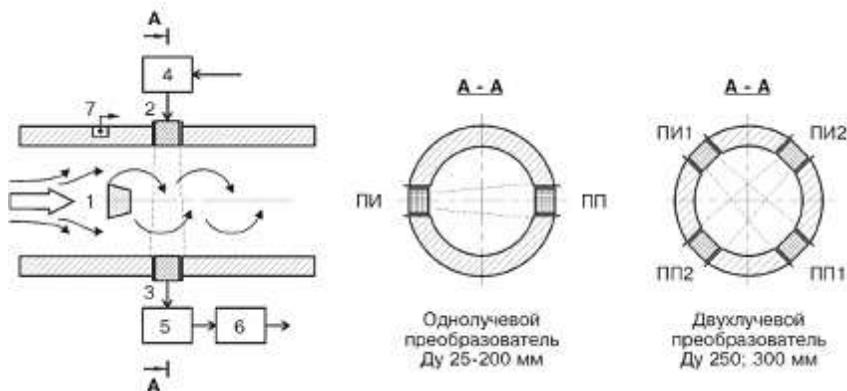


Рис. 2.61. Вихреакустический расходомер:

1 – тело обтекания; 2 – пьезоизлучатель; 3 – пьезоприемник; 4 – генератор; 5 – фазовый детектор; 6 – микропроцессорный блок; 7 – термодатчик

На *III* ультразвуковые колебания преобразуются в электрические и подаются на фазовый детектор.

На фазовом детекторе определяется разность фаз между сигналами с *III* и опорного генератора. На выходе фазового детектора образуется напряжение, которое по частоте и амплитуде соответствует интенсивности и частоте следования вихрей, которая в силу пропорциональности скорости потока является мерой расхода.

*Вихреакустические расходомеры* применяются в чистых жидкостях с низкой вязкостью без завихрений, которые движутся со средней или высокой скоростью. В потоке не должно быть завихрений, поскольку они могут повлиять на точность измерений. Любая эрозия, коррозия или отложения, которые могут изменить форму плохо обтекаемого тела, могут повлиять на калибровку расходомера, и поэтому идеальные условия предусматривают чистые жидкости.

### 2.3.11. Калориметрические расходомеры [35; 62]

Принцип действия *калориметрических расходомеров* основан на нагреве потока жидкости или газа посторонним источником энергии, создающим в потоке разность температур, зависящую от скорости потока и расхода теплоты в нагревателе. Если пренебречь теплом, отдаваемым потоком через стенки трубопровода в окружающую среду, то зависимость между массовым расходом  $G$  и разностью температур  $\Delta t$  при больших расходах определяется уравнением теплового баланса:

$$G = N/k Q_{cp} \Delta t, \quad (2.44)$$

где  $N$  – мощность нагревателя;  $k$  – поправочный множитель на неравномерность распределения температур по сечению трубопровода;  $Q_{cp}$  – теплоемкость вещества при температуре  $(t_1 + t_2)/2$ ,  $\Delta t$  – разность температур до и после нагревателя.

Существует несколько разновидностей тепловых расходомеров. Наиболее распространены *тепловые калориметрические расходомеры*, принцип действия которых основан на нагреве потока вещества и измерении разности температур до и после нагревателя.

На *рис. 2.62* показана схема *калориметрического расходомера*, а также кривые распределения температуры среды до и после нагревателя при его постоянной выделяемой тепловой мощности.

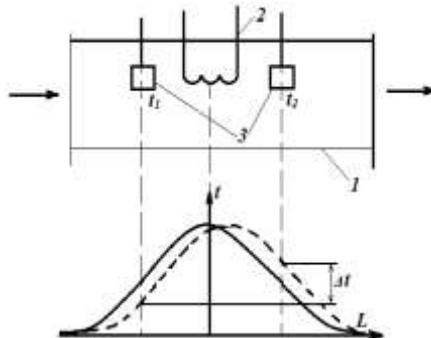


Рис. 2.62. Калориметрический расходомер:

- 1 – трубопровод; 2 – нагреватель потока; 3 – термопреобразователи;  
 $t$  – температура;  $L$  – длина трубопровода

В трубопроводе 1 установлен нагреватель потока 2. На равных расстояниях от центра нагревателя расположены термопреобразователи 3, измеряющие температуру потока до и после нагрева. Для неподвижной среды распределение температуры в ней (на графике – сплошная линия) симметрично относительно оси нагревателя и поэтому разность температур  $\Delta t = t_2 - t_1 = 0$ . При некоторой малой скорости потока распределение температуры (на графике – штриховая линия) несимметрично и несколько смещается вправо.

При малых расходах температура  $t_1$  падает вследствие поступления холодного вещества, а температура  $t_2$  возрастает, вследствие чего  $\Delta t$  увеличивается с ростом расхода. С дальнейшим увеличением расхода при постоянной мощности нагревателя  $t_2$  станет убывать, в то время как  $t_1$  практически постоянна, т. е.  $\Delta t$  будет уменьшаться. Таким образом, при малых расходах разность температур  $\Delta t$  прямо пропорциональна расходу, а при больших – обратно пропорциональна.

Из выражения (2.44) следует, что измерение массового расхода может быть осуществлено двумя способами:

1) по значению подаваемой к нагревателю мощности  $N$ , обеспечивающей постоянную заданную разность температур  $\Delta t$ ;

2) по значению разности  $\Delta t$  при неизменной мощности  $N$ , подводимой к нагревателю.

В соответствии с первым способом расходомер работает как регулятор температуры нагрева потока, когда измерительным и регулирующим элементом является уравновешенный мост с термометрами сопротивления до и после нагревателя. При изменении  $\Delta t$  мощность  $N$  автоматически изменяется до тех пор, пока  $\Delta t$  не достигнет заданного значения. При изменении разности температур мост выходит из равновесия и включает устройство, регулирующее сопротивление изменяет мощность  $N$  автоматически до тех пор, пока  $\Delta t$  не достигнет заданного значения. Массовый расход при этом определяется по шкале ваттметра в цепи нагревателя. Для уменьшения расходуемой мощности обычно ограничивают заданное значение  $\Delta t$  в пределах  $1-3^\circ \text{C}$ .

По второму способу, когда к нагревателю подводится постоянная мощность, расход определяют по прибору, измеряющему разность температур. Недостатком этого способа является гиперболический характер шкалы, а значит, и падение чувствительности при увеличении расхода.

Внешний вид *калориметрического расходомера* приведен на *рис. 2.63*.



Рис. 2.63. Внешний вид калориметрического расходомера

Калориметрические расходомеры в основном применяют для измерения малых расходов чистых газов. Основное преимущество этих расходомеров – измерение массового расхода газа без измерения его давления и плотности.

В качестве преобразователей температуры в калориметрических расходомерах могут быть использованы термоэлектрические преобразователи, термопреобразователи сопротивления и др.

Датчики калориметрических расходомеров с термопреобразователями сопротивления (*рис. 2.64*) состоят из двух последовательно соединенных термометров сопротивления, устанавливаемых до и после нагревателя. Последовательное соединение термометров обеспечивает равенство токов в их цепях, что позволяет градуировать их непосредственно по разности температур.

Кроме термометров сопротивления используют также термисторы и термопары.

Термометры сопротивления обладают тем преимуществом, что их можно выполнять в виде равномерной сетки, перекрывающей все сечения потока, и таким образом измерять среднюю по сечению температуру.

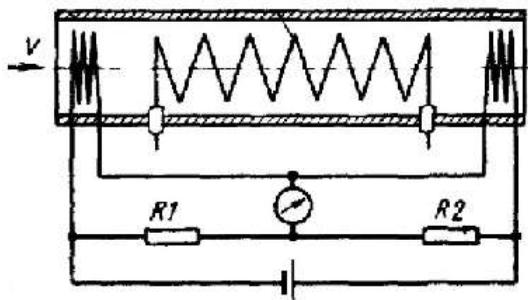


Рис. 2.64. Калориметрический расходомер: термометры сопротивления, электрический нагреватель

Термометры сопротивления включают в плечи моста, два плеча которого составляют резисторы сопротивлением  $R_1$  и  $R_2$ .

Калориметрические расходомеры обладают достаточно высокой точностью, оцениваемой (в условиях индивидуальной градуировки) приведенной погрешностью ( $\pm 0,5-1,0$  %), большим диапазоном измерений (10:1 и выше), малой инерционностью.

Недостатками их являются сложность измерительных схем и нестабильность характеристик, связанная с коррозией приемных устройств и осаждением на них различных частиц, переносимых потоком.

Данные приборы можно применять для измерения массового расхода как жидкостей, так и газов, но в настоящее время ими измеряют главным образом малые (в трубках диаметром 2-3 мм) и средние расходы чистых газов.

## § 2.4. Измерение уровня

### 2.4.1. Основные понятия

В настоящее время операция измерения уровня является ключевой для организации контроля и управления технологическими процессами в химическом, нефтехимическом и нефтеперерабатывающем производствах, в пищевой промышленности, промышленности строительных материалов, в системах экологического мониторинга и во многих других отраслях. К приборам для измерения уровня заполнения емкостей и сосудов, или уровнемерам, предъявляются различные требования: в одних случаях требуется только сигнализировать о достижении определенного предельного значения, в других необходимо проводить непрерывное измерение уровня заполнения [63-69].

### 2.4.2. Классификация приборов для измерения уровня

Существует широкая номенклатура средств контроля и измерения уровня, использующих различные физические методы: *поплавковый, буйковый, емкостный, гидростатического давления, ультразвуковой, радарный* и др. (рис. 2.65).

Эти методы и средства позволяют контролировать уровень различных сред: жидких (чистых, загрязненных), пульп, нефтепродуктов, сыпучих твердых различной дисперсности.

При выборе уровнемера необходимо учитывать такие физические и химические свойства контролируемой среды, как температура, абразивные свойства, вязкость, электрическая проводимость, химическая агрессивность и т. д. Кроме того, следует принимать во внимание рабочие условия в резервуаре или около него: давление, вакуум, нагревание, охлаждение, способ заполнения или опорожнения (пневматический или механический), наличие мешалки, огнеопасность, взрывоопасность и другие.

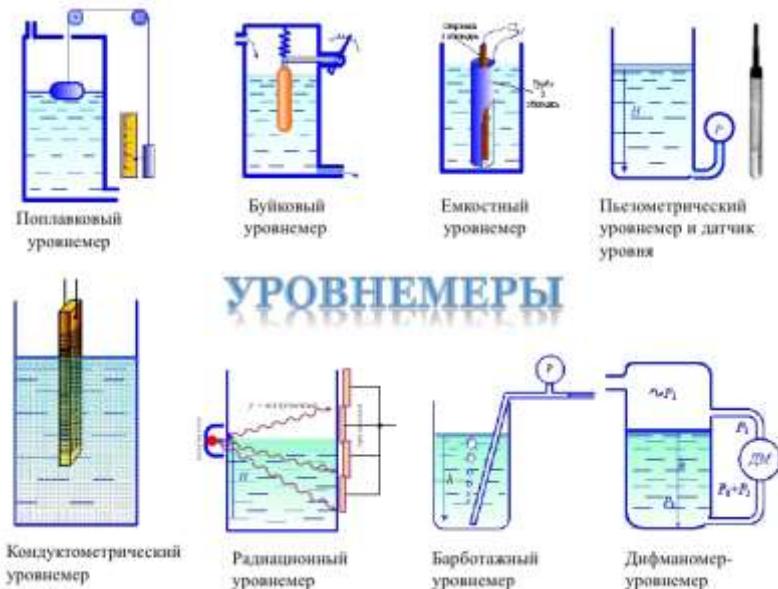


Рис. 2.65. Типовые схемы уровнемеров

Устройства для измерения уровня жидкостей можно подразделить на следующие:

- визуальные;
- поплавковые, в которых для измерения уровня используется поплавок или другое тело, находящееся на поверхности жидкости;
- буйковые, в которых для измерения уровня используется массивное тело (бук), частично погружаемое в жидкость;
- гидростатические, основанные на измерении гидростатического давления столба жидкости;
- электрические, в которых величины электрических параметров зависят от уровня жидкости;
- ультразвуковые, основанные на принципе отражения от поверхности звуковых волн;
- радарные и волноводные, основанные на принципе отражения от поверхности сигнала высокой частоты (СВЧ);

- радиоизотопные, основанные на использовании интенсивности потока ядерных излучений, зависящих от уровня жидкости.

Помимо классификации уровнемеров по принципу действия, эти приборы делятся на:

- приборы для непрерывного слежения за уровнем;
- приборы для сигнализации о предельных значениях уровня (сигнализаторы уровня).

### 2.4.3. Визуальные уровнемеры

Простейшим измерителем уровня жидкости служат указательные стекла (рис. 2.66).

Работа указательных стекол основана на принципе сообщающихся сосудов. Указательное стекло соединяют с сосудом нижним концом (для открытых сосудов) или обоими концами (для сосудов с избыточным давлением или разрежением). Наблюдая за положением уровня жидкости в стеклянной трубке, можно судить об изменении уровня в сосуде. Указательные стекла снабжают вентилями или кранами для отключения их от сосуда и продувки системы.

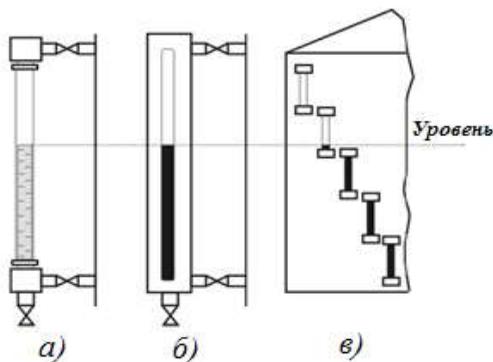


Рис. 2.66. Примеры реализации простейших стеклянных уровнемеров:  
а – проходящего света; б – отраженного света; в – составного типа

В арматуру указательных стекол сосудов, работающих под давлением, обычно вводят предохранительные устройства, автоматически закрывающие каналы в головках при случайной поломке стекла. Существуют указательные стекла проходящего (рис. 2.66а) и отраженного света (рис. 2.66б). Плоские указательные стекла рассчитаны на давление до 2,94 МПа и температуру до 300° С.

Указательные стекла не рекомендуется употреблять длиной более 0,5 м, поэтому при контроле уровня, изменяющегося больше чем на 0,5 м, устанавливают несколько стекол (рис. 2.66в) так, чтобы верх предыдущего стекла перекрывал низ последующего.

#### 2.4.4. Поплавковые уровнемеры

Среди существующих разновидностей уровнемеров поплавковые являются наиболее простыми (рис. 2.67). Получили распространение поплавковые уровнемеры узкого и широкого диапазонов.

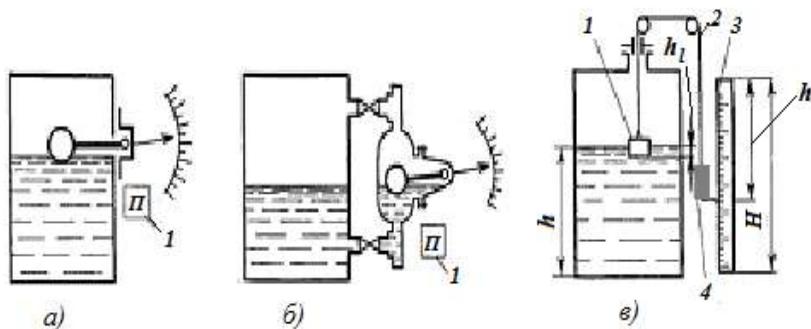


Рис. 2.67. Схемы реализации поплавковых уровнемеров:

а – узкого диапазона; б – широкого диапазона; в: 1 – поплавок; 2 – гибкий трос; 3 – шкала; 4 – противовес

Поплавковые уровнемеры узкого диапазона (рис. 2.67а) обычно представляют собой устройства, содержащие шарообразный поплавок диаметром 80-100 мм, выполненный из нержавеющей стали. Поплавок плавает на поверхности жидкости и через штангу и специальное сальниковое уплотнение соединяется либо со стрелкой

измерительного прибора, либо с преобразователем  $\Pi$  угловых перемещений в унифицированный электрический или пневматический сигналы.

Поплавковые уровнемеры широкого диапазона (рис. 2.67б) представляют собой поплавок 1, связанный с противовесом 4 гибким тросом 2. В нижней части противовеса укреплен стрелка, указывающая по шкале 3 значения уровня жидкости в резервуаре. При расчетах поплавок подбирают такие конструктивные параметры поплавок, которые обеспечивают состояние равновесия системы «поплавок - противовес» только при определенной глубине погружения поплавок.

Если пренебречь силой тяжести троса и трением в роликах, состояние равновесия системы «поплавок - противовес» описывается уравнением:

$$G_{\Gamma} = G_{\Pi} + S \cdot h_l \cdot \rho_{ж} \cdot g, \quad (2.45)$$

где  $G_{\Gamma}$ ,  $G_{\Pi}$  - силы тяжести противовеса (груза) и поплавок;  $S$  - площадь поплавок;  $h_l$  - глубина погружения поплавок;  $\rho_{ж}$  - плотность жидкости.

Повышение уровня жидкости изменяет глубину погружения поплавок, и на него действует дополнительная выталкивающая сила. В результате равенство (2.45) нарушается, и противовес опускается вниз до тех пор, пока глубина погружения поплавок не станет равной  $h_l$ . При понижении уровня действующая на поплавок выталкивающая сила уменьшается, и поплавок начинает опускаться вниз до тех пор, пока глубина погружения поплавок не станет равной  $h_l$ .

#### 2.4.5. Буйковые уровнемеры

В основу работы буйковых уровнемеров положено физическое явление, описываемое законом Архимеда. Он гласит, что на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила  $F$ , пропорциональная весу вытесненной им жидкости.

Чувствительным элементом в этих уровнемерах является цилиндрических боек, изготовленный из материала с плотностью, большей плотности жидкости. Зачастую боек выполнен в виде тру-

бы из нержавеющей стали длиной  $H_0$ , запаянной с обеих сторон, к одному из концов которой приделан крючок. Буюк находится в вертикальном положении и частично погружен в жидкость. Длина буйка  $H_0$  подбирается приближенной к максимальному измеряемому уровню в аппарате.

При изменении уровня жидкости в аппарате согласно закону Архимеда вес буйка в жидкости изменяется пропорционально изменению уровня.

Выталкивающая сила, действующая на буюк, равна

$$F = \rho \cdot g \cdot V_{жс} = \rho \cdot g \cdot S \cdot h, \quad (2.46)$$

где  $\rho$  – плотность измеряемой жидкости;  $g$  – ускорение свободного падения;  $V_{жс}$  – объем вытесненной буйком жидкости;  $S$  – площадь поперечного сечения буйка;  $h$  – длина буйка, погруженно-го в жидкость.

Измерительная схема буйкового уровнемера приведена на *рис. 2.68*.

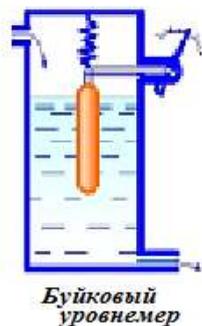


Рис. 2.68. Измерительная схема буйкового уровнемера

Уровнемер работает следующим образом. Когда уровень жидкости в аппарате равен или меньше начального  $h_0$  (величина  $h_0$  называется зоной нечувствительности уровнемера), измерительная штанга, на которую подвешен буюк, находится в равновесии и стрелка показывает на нулевую отметку, поскольку момент, со-

здаваемый весом буйка, уравновешивается моментом, создаваемым противовесом.

Когда уровень жидкости становится больше  $h_0$  (например,  $h$ ), часть буйка длиной  $(h - h_0)$  погружается в жидкость, поэтому вес буйка уменьшается на величину

$$F = \rho g S(h - h_0), \quad (2.47)$$

а следовательно, уменьшается и момент, создаваемый буйком на штанге. Штанга поворачивается вокруг точки  $O$  по часовой стрелке на небольшой угол и перемещает рычаг преобразователя. Движение стрелки преобразователя происходит до тех пор, пока сумма моментов всех сил, действующих на рычаг, не станет равной нулю.

Минимальный верхний предел измерений *буйковых уровнемеров* - 0,025 м, максимальный - 16 м. Значение верхнего предела измерений приборов должно выбираться из ряда: 250; 400; 600; 1000; 1600; 2500; 4000; 6000; 8000; 10000 мм, хотя по согласованию с заказчиком длина буйка может быть выполнена индивидуально.

#### 2.4.6. Гидростатические уровнемеры

Данный метод измерения уровня основан на определении гидростатического давления, оказываемого жидкостью на дно резервуара. Величина гидростатического давления на дно резервуара  $P_r$  зависит от высоты столба жидкости над измерительным прибором  $h$  и от плотности жидкости  $\rho$ , т. е.  $P_r = \rho gh$ , соответственно  $h = P_r / \rho g$ , где  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$  (это справедливо только для неподвижных жидкостей).

Измерение гидростатического давления может осуществляться:

- датчиком избыточного давления (*манометром*), подключаемым на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня;
- дифференциальным манометром, подключаемым к резервуару на высоте, соответствующей нижнему предельному значению уровня, и к газовому пространству над жидкостью;

- измерением давления газа (воздуха), прокачиваемого по трубке, опущенной в заполняющую резервуар жидкость на фиксированное расстояние (*пьезометрический метод*).

На рис. 2.69 приведена схема измерения уровня датчиком избыточного давления (*манометром*). Применяемый для этих целей датчик избыточного давления (*ДИ*) может быть любого типа с соответствующими пределами измерений, определяемыми зависимостью  $P_r = \rho gh$ .

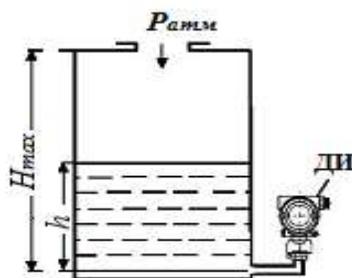


Рис. 2.69. Измерение уровня в резервуаре при помощи датчика избыточного давления

При измерении уровня данным способом имеют место погрешности измерения, определяемые классом точности измерительного прибора, изменениями плотности жидкости, а также колебаниями атмосферного давления. Если сосуд находится под избыточным давлением, данная измерительная схема непригодна, т. к. к гидростатическому давлению прибавляется избыточное давление над поверхностью жидкости, не учитываемое данной измерительной схемой.

Более широкое применение получили схемы измерения уровня с использованием дифференциальных датчиков давления (*дифманометров*). Эти схемы используются для измерения уровня жидкости в технологических аппаратах, находящихся под избыточным давлением. С помощью *дифференциальных датчиков давления (ДД)* возможно также измерение уровня жидкости в открытых резервуарах, уровня раздела жидкостей.

Измерение уровня в открытых резервуарах, находящихся под атмосферным давлением, осуществляется по схеме, представленной на рис. 2.70.

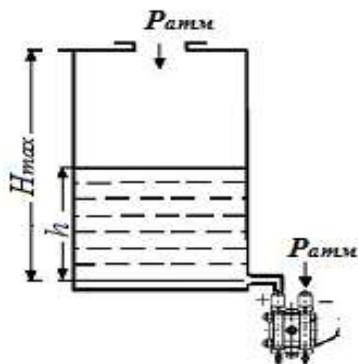


Рис. 2.70. Измерение уровня в открытом резервуаре при помощи датчика в его нижней точке

Дифманометр (ДД) через импульсную трубку плюсовой камеры соединен с резервуаром дифференциального давления. При этом минусовая камера должна сообщаться с атмосферой. В этом случае устраняется погрешность, связанная с колебаниями атмосферного давления, т. к. результирующий перепад давления на дифманометре равен:

$$\Delta P = (P_{\Gamma} + P_{атм}) - P_{атм} = P_{\Gamma}. \quad (2.48)$$

Данная измерительная схема используется, если дифманометр расположен на одном уровне с нижней плоскостью резервуара. В случае, если дифманометр оказывается ниже уровня на высоту  $h_1$ , целесообразно использование уравнительных сосудов (УС).

Схемы измерения с уравнительным сосудом для резервуаров, находящихся под атмосферным давлением, представлены на рис. 2.71.

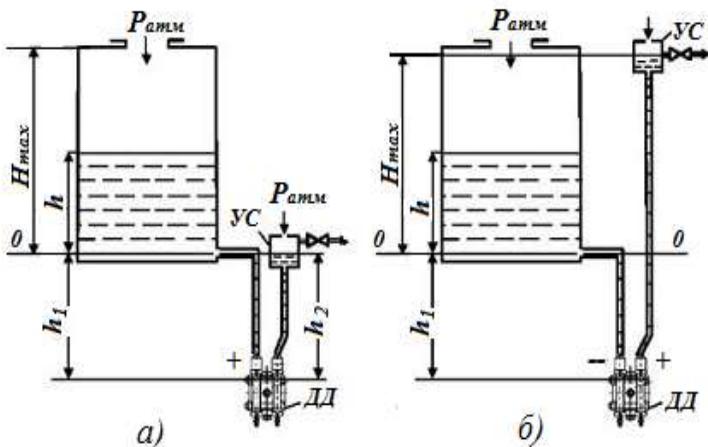


Рис. 2.71. Измерение уровня в открытом резервуаре при помощи датчика дифференциального давления с использованием уравнительного сосуда: а – с нижним расположением уравнительного сосуда; б – с верхним расположением уравнительного сосуда

Уравнительный сосуд применяется для компенсации статического давления, создаваемого столбом жидкости  $h_1$  в импульсной трубке. При измерении уровня в аппаратах, находящихся под избыточным давлением  $P_{изб}$ , применяют схему, приведенную на рис. 2.71.  $P_{изб}$  поступает в обе импульсные трубки дифманометра, поэтому измеряемый перепад давления  $\Delta P$  можно представить в виде:

$$\Delta P = \rho g H_{max} - \rho g h. \quad (2.49)$$

При  $h = 0$  максимальное значение  $\Delta P = \Delta P_{max}$ , а при  $h = H_{max}$   $\Delta P = 0$ . Как следует из уравнения, шкала измерительного прибора уровня будет обращенной.

В последнее время широкое распространение получили датчики гидростатического давления (ДГ) (рис. 2.72).



Рис. 2.72. Датчик гидростатического давления

Типовые ДД, как и дифманометры, имеют две измерительные камеры, одна из которых выполнена в виде открытой мембраны, а вторая - в виде штуцера. Данный уровнемер всегда закрепляется непосредственно у дна резервуара, поэтому не имеет импульсных трубок, а значит, отсутствует необходимость в компенсации высоты импульсной трубки  $h_1$ .

Возможные измерительные схемы с использованием *гидростатического датчика давления* представлены на *рис. 2.73*.

Схему, представленную на *рис. 2.73в*, целесообразно использовать для процессов, где невозможно избежать обильного образования и накопления конденсата в трубе, соединяющей датчик с объемом над жидкостью.

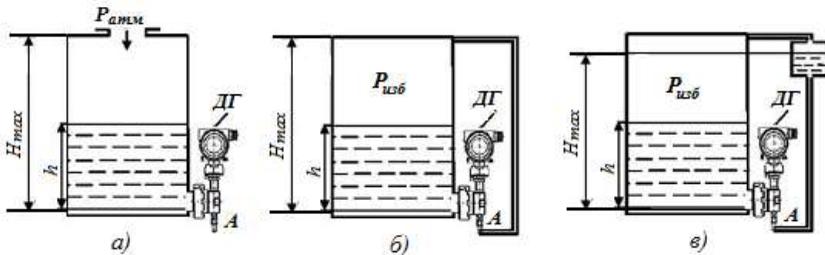


Рис. 2.73. Схемы измерения уровня в резервуарах при помощи датчика гидростатического давления: а – для открытых резервуаров; б – для закрытых резервуаров без уравнильного сосуда; в – для закрытых резервуаров с уравнильным сосудом

Уровнемеры, в которых измерение гидростатического давления осуществляется путем измерения давления газа, прокачиваемого по трубке, погруженной на фиксированную глубину в жидкость, называют пьезометрическими.

Схема пьезометрического уровнемера приведена на *рис. 2.74*. Его работа основана на принципе гидравлического затвора. Пьезометрическая трубка *П* размещается в аппарате, в котором измеряется уровень. Для измерения уровня используют воздух или инертный газ под давлением  $P_{п}$ , который продувают через слой жидкости. Газ поступает в трубку через дроссель *Д*, служащий для ограничения расхода. Давление  $P$  газа после дросселя измеряется дифманометром (*ДД*).

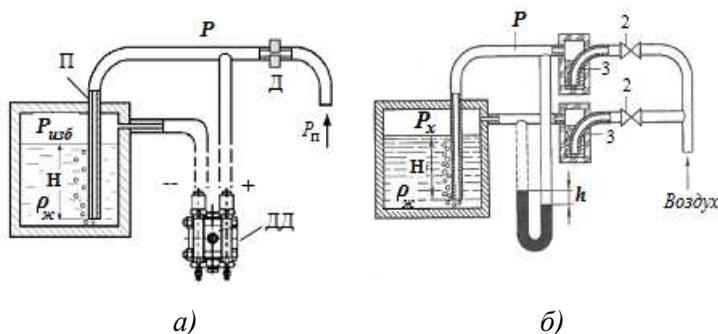


Рис. 2.74. Пьезометрические уровнемеры для жидкостей под давлением:  
 а – схема измерения для неагрессивных жидкостей;  
 б – схема измерения для агрессивных жидкостей

При подаче газа давление в пьезометрической трубке постепенно повышается до тех пор, пока не станет равным давлению столба жидкости высотой  $H$  плюс давление над жидкостью  $P_{изб}$  (если имеется). Когда давление в трубке станет равным сумме этих давлений, из нижнего открытого конца трубки начинает выходить газ. Расход подбирают такой, чтобы газ покидал трубку в виде отдельных пузырьков (примерно один пузырек в секунду).

Уровень жидкости определяется по установившемуся давлению ( $P - P_{изб}$ ) в системе:

$$P - P_{изб} = H \rho_{ж} g, \quad (2.50)$$

где  $P_{изб}$  – избыточное давление в аппарате (в частном случае  $P_{изб} = P_{атм}$ ).

В случае измерения уровня в сосудах, заполненных агрессивными жидкостями и газами (*рис. 2.74, б*), обязателен непрерывный подвод воздуха или инертного газа в обе линии, подсоединяемые к дифференциальному манометру. Для наблюдения за непрерывностью на каждой линии устанавливают стеклянные контрольные сосуды КС (3) с водяным затвором, по которому видно движение воздуха, или ротаметры. Количество подводимого воздуха устанавливают регулирующими вентилями РВ (2).

#### 2.4.7. Электрические уровнемеры

В электрических уровнемерах уровень жидкости преобразуется в какой-либо электрический сигнал. Наиболее распространены емкостные и омические уровнемеры.

Работа емкостных уровнемеров основана на том, что диэлектрическая проницаемость водных растворов солей, кислот и щелочей отличается от диэлектрической проницаемости воздуха либо водных паров.

Принципиальная схема емкостного уровнемера показана на *рис. 2.75*. В сосуд с жидкостью, уровень которой необходимо измерить, опущен преобразователь, представляющий собой электрический конденсатор, емкость которого зависит от уровня жидкости. Преобразователи выполняют цилиндрического и пластинчатого типов, а также в виде жесткого стержня.

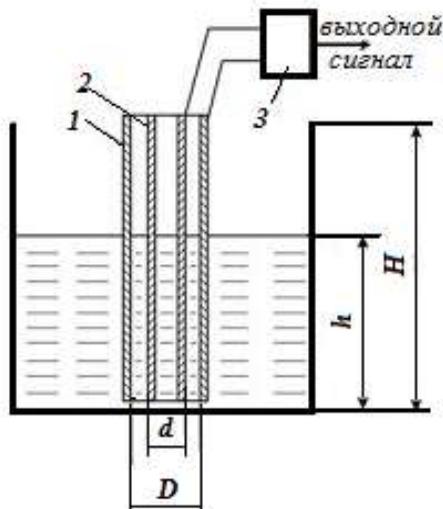


Рис. 2.75. Емкостный уровнемер:  
1, 2 – электроды; 3 – электронный блок

Цилиндрический емкостной преобразователь выполнен из двух или нескольких concentrically расположенных труб, между которыми находится слой жидкости высотой  $h$ . Емкость преобразователя равна сумме емкостей двух участков – погруженного в жидкость с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{ж}$  и находящегося в среде с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_{ср}$  (для воздуха  $\epsilon_{ср}=1$ ).

В общем виде электрическая емкость цилиндрического конденсатора определяется уравнением

$$C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 H / [\ln(D/d)], \quad (2.51)$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость вещества, заполняющего межэлектродное пространство;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $H$  – высота электродов;  $D$ ,  $d$  – диаметры соответственно наружного и внутреннего электродов.

Для цилиндрического конденсатора, межэлектродное пространство которого заполняется веществами, обладающими различ-

ными диэлектрическими проницаемостями, как показано на *рис. 2.75*, полная емкость  $C_{II}$  определяется выражением:

$$C_{II} = C_0 + C_1 + C_2, \quad (2.52)$$

где  $C_0$  – емкость проходного изолятора;  $C_1$  – емкость межэлектродного пространства, заполненного жидкостью;  $C_2$  – емкость межэлектродного пространства, заполненного парогазовой смесью.

Всегда учитывают, что при увеличении высоты жидкости  $C_1$  и  $C_2$  растут, поскольку увеличивается площадь обкладки.

С учетом уравнения (1.48) полную емкость чувствительного элемента представим в виде:

$$C_{II} = C_0 + \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{жс}h}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{г}(H-h)}{\ln(D/d)}. \quad (2.53)$$

Так как для паров жидкости и газов  $\varepsilon_{г} \sim 1$ , а  $C_0$  – величина постоянная, уравнение (2.53) можно представить в виде:

$$C_{II} = C_0 + \frac{2\pi\varepsilon_0h}{\ln(D/d)} H \left[ 1 + (\varepsilon_{жс} - 1) \frac{h}{H} \right]. \quad (2.54)$$

Уравнение (2.54) представляет собой статическую характеристику емкостного чувствительного элемента для неэлектропроводных сред. Величина  $\varepsilon_{жс}$  является функцией температуры, поэтому для исключения влияния температуры жидкости на результат измерения часто применяют компенсационный конденсатор. Компенсационный конденсатор размещается, как правило, ниже емкостного датчика и полностью погружен в жидкость. В некоторых случаях при постоянстве состава жидкости его заменяют конденсатором постоянной емкости.

В точном определении уровня решающую роль играют конструкция, изоляция и правильное размещение емкостного зонда. Поэтому необходимо учитывать следующие факторы: изоляцию зонда, форму резервуара, давление в резервуаре, температуру контролируемого материала, его зернистость, абразивность, химическую агрессивность, вязкость, возможность образования конденсата или пены.

Измерительный зонд в зависимости от требуемой длины выполняются из проволочного тросика, металлического стержня или трубки.

Преобразование электрической емкости чувствительных элементов в сигнал измерительной информации осуществляется резонансным, импульсным методом или с помощью мостов переменного тока с самоуравновешиванием (электронный блок 3). В емкостных уровнемерах, входящих в номенклатуру ГСП, преобразование емкости осуществляется импульсным методом, в реализации которого используются переходные процессы, протекающие в чувствительном элементе, периодически подключаемом к источнику постоянного напряжения.

При измерении уровня агрессивных, но неэлектропроводных жидкостей обкладки преобразователя выполняются из химически стойких сплавов или покрывают тонкой антикоррозионной пленкой, диэлектрические свойства которой учитывают при расчете. Покрытие обкладок тонкими пленками применяют также при измерении уровня электропроводных жидкостей.

Емкостные уровнемеры выпускаются классов точности 0,5; 1,0; 2,5. Их минимальный диапазон измерений составляет 0-0,4 м, максимальный 0-20 м; давление рабочей среды 2,5-10 МПа; температура от -60 до +100° С или от 100 до 250° С. На базе рассмотренных емкостных чувствительных элементов разработаны взрывобезопасные сигнализаторы уровня раздела жидкостей «нефтепродукт-вода» и других жидкостей с различными значениями относительной диэлектрической проницаемости. При длине погруженной части чувствительного элемента 0,25 м погрешность срабатывания сигнализатора ±10 мм.

Емкостные средства контроля предельного уровня хорошо представлены в номенклатуре фирмы *Pepperl+Fuchs* концевыми выключателями серии *LCL*.

*Омические уровнемеры* используют главным образом для сигнализации и поддержания в заданных пределах уровня электропроводных жидкостей. Принцип их действия основан на замыкании

электрической цепи источника питания через контролируемую среду, представляющую собой участок электрической цепи с определенным омическим сопротивлением. Прибор представляет собой электромагнитное реле, включаемое в цепь между электродом и контролируемым материалом. Схемы включения релейного сигнализатора уровня могут быть различны в зависимости от типа объекта и числа контролируемых уровней (рис. 2.76).

На рис. 2.76,а показана схема включения прибора в токопроводящий объект. В этом случае для контроля одного уровня  $h$  можно использовать один электрод, одно реле и один провод. При контроле двух уровней  $h_1$  и  $h_2$  (рис. 2.76б) их требуется уже по два.

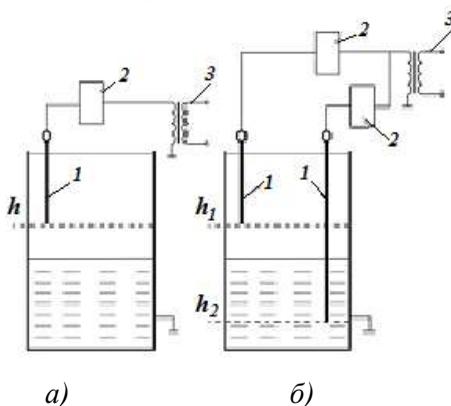


Рис. 2.76. Омические сигнализаторы уровня:

а – одного уровня; б – двух уровней; 1 – электрод; 2 – электромагнитное реле; 3 – источник питания

В качестве электродов применяют металлические стержни или трубы и угольные электроды (агрессивные жидкости).

Основной недостаток всех электродных приборов – невозможность их применения в средах вязких, кристаллизующихся, образующих твердые осадки и налипающих на электроды преобразователей.

#### 2.4.8. Радиоизотопные уровнемеры

Уровнемеры с радиоизотопными излучателями делятся на две группы:

- 1) со следящей системой, для непрерывного измерения уровня;
- 2) сигнализаторы (индикаторы) отклонения уровня от заданного значения.

Принципиальная схема следящего уровнемера приведена на *рис. 2.77*.

Действие прибора основано на сравнении интенсивностей потоков  $\gamma$ -лучей, проходящих выше или ниже уровня раздела двух сред разной плотности.

Комплект прибора состоит из трех блоков:

- преобразователя, содержащего источник и приемник излучения;
- электронного блока;
- показывающего прибора.

Преобразователь на фланцах *4* присоединен к вертикальным трубкам *2*, установленным внутри объекта измерения. Расположенный в герметичном корпусе преобразователя реверсивный двигатель *6* через червячную передачу *7* вращает барабан *8*, на котором укреплен стальная лента *3*. На концах ленты свободно висят источник излучения *1* и приемник излучения *13*. Электрический сигнал от приемника излучения через гибкий кабель *11* передается на электронный блок. При перемещении приемника кабель фиксируется в определенном положении при помощи ролика *14* с грузом. Лента *3* проходит через зубчатый ролик *9*, на оси которого расположен первичный сельсин *10*.

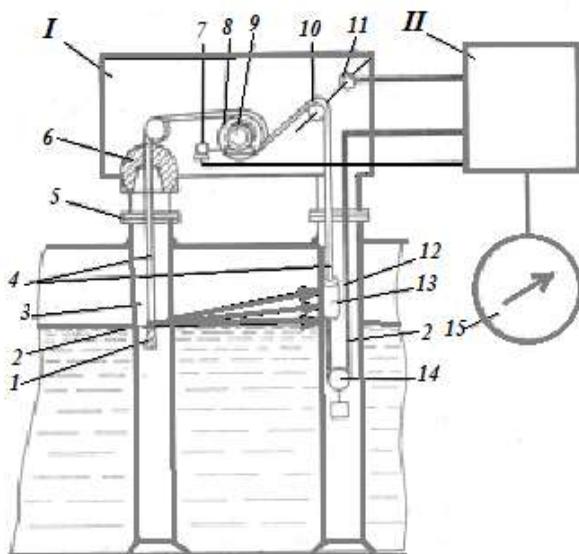


Рис. 2.77. Радиоизотопный уровнемер:

- 1 – свинцовая пробка; 2 – источник излучения; 3 – трубки;  
 4 – стальная лента; 5 – фланцы; 6 – свинцовый контейнер; 7 – реверсивный двигатель; 9 – червячная передача; 8 – барабан; 10 – зубчатый ролик;  
 11 – первичный сельсин; 12 – гибкий кабель; 15 – показывающий прибор;  
 13 – приемник излучения; 14 – ролик с грузом

Вторичный сельсин находится в показывающем приборе. Ось вторичного сельсина через редуктор связана со стрелками показывающего прибора 12, который имеет две шкалы, градуированные в метрах и сантиметрах. В показывающем приборе имеется преобразователь, преобразующий угловое перемещение оси вторичного сельсина, пропорциональное положению уровня, в стандартный пневматический сигнал. Стандартная индукционная катушка служит для связи с вторичными приборами дифференциально-трансформаторной системы. Для обеспечения радиационной защиты персонала при транспортировке, монтаже и ремонтных работах внутри объекта измерения источник излучения перемещается автоматически в свинцовый контейнер 5. Отверстие в контейнере

при этом закрывается свинцовой пробкой 15, жестко связанной с источником. Диапазон измерения уровня прибором до 10 м, основная погрешность измерения не превышает 1 см.

Использование приборов с радиоизотопными излучателями целесообразно там, где другие методы измерения непригодны.

### 2.4.9. Ультразвуковые уровнемеры

*Ультразвуковые уровнемеры* (частота выше 20 КГц) позволяют измерять уровень в отсутствие контакта с измеряемой средой и в труднодоступных местах. В ультразвуковых уровнемерах обычно используется принцип отражения звуковых волн от границы раздела «жидкость – газ (воздух)».

На рис. 2.78 показана измерительная схема ультразвукового уровнемера, работающего на отражении звука от границы раздела двух сред.

Прибор состоит из электронного блока (ЭБ), пьезоэлектрического излучателя (преобразователя) и вторичного прибора. Электронный блок состоит из генератора 1, задающего частоту повторения импульсов, генератора импульсов 2, посылаемых в измеряемую среду, приемного усилителя 4 и измерителя времени 5.

Генератор 1 управляет работой генератора 2 и схемой измерения времени. Генератор 2 формирует короткие импульсы для возбуждения пьезоэлектрического излучателя 3. Электрический импульс, преобразованный в ультразвуковой в пьезоэлектрическом излучателе, распространяется в газовой среде, отражается от границы раздела «жидкость – воздух», возвращается обратно, воздействуя спустя некоторое время на тот же излучатель, и преобразуется в электрический сигнал.

Оба импульса - посланный и отраженный, разделенные во времени, поступают на усилитель 4.

Время  $\tau$  между моментом посылки импульса и моментом поступления отраженного импульса является функцией высоты измеряемого уровня, т. е.

$$\tau = 2(H_{max} - h) / c, \quad (2.55)$$

где  $H_{max}$  – максимальный измеряемый уровень;  $h$  – текущий уровень;  $c$  – скорость распространения ультразвука в измеряемой среде.

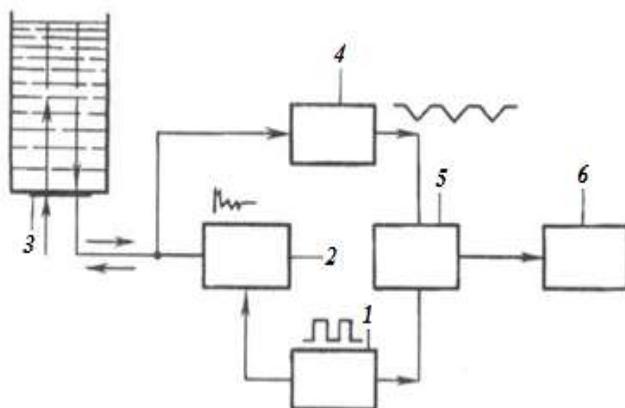


Рис. 2.78. Измерительная схема ультразвукового уровнемера:

1 – задающий генератор; 2 – генератор импульсов; 3 – пьезоэлектрический излучатель; 4 – усилитель; 5 – измеритель времени; 6 – вторичный прибор

Постоянное напряжение, пропорциональное времени запаздывания отраженного сигнала (уровню), получаемое в измерителе времени, подается на вторичный прибор 6.

Химические и физические свойства среды не влияют на результат измерения, полученный ультразвуковым методом, поэтому без проблем может измеряться уровень агрессивных, абразивных, вязких и клейких веществ. Однако необходимо помнить, что на скорость распространения ультразвука оказывает влияние температура воздуха в среде его распространения. Кроме того, будучи сильно зависимой от температуры, скорость ультразвука зависит от давления воздуха: она увеличивается с ростом давления. Связанные с изменениями давления в нормальной атмосфере относительные изменения скорости звука составляют приблизительно 5%. Скорость ультразвука также зависит от состава воздуха, например, от процентного содержания  $CO_2$  и влажности. Влияние относительной влажности на скорость ультразвука является меньшим по срав-

нению с влиянием, оказываемым температурой и давлением: дополнительная разница скорости в сухом и насыщенном влагой воздухе составляет около 2 %.

Основные достоинства метода:

- бесконтактный;
- применим для загрязненных жидкостей;
- реализация метода не предъявляет высоких требований к износостойкости и прочности оборудования;
- независимость от плотности контролируемой среды.

Недостатки:

- большое расхождение конуса излучения;
- отражения от нестационарных препятствий могут вызвать ошибки измерения;
- применим только в резервуарах с нормальным атмосферным давлением;
- на сигнал оказывают влияние пыль, пар, газовые смеси и пена.

#### **2.4.10. Радарные уровнемеры [70]**

Существует множество самых различных методов контроля уровня, позволяющих получать информацию как о предельных его значениях, так и о текущем значении. Гораздо меньшее число методов реализовано в промышленных системах. Некоторые из реализованных методов являются уникальными, и случаи их применения можно пересчитать по пальцам одной руки, другие – гораздо более универсальны и потому широко используются в серийных системах. Но есть и методы, удачно сочетающие в себе и уникальность, и универсальность.

В первую очередь, к ним можно отнести микроволновый бесконтактный метод, в просторечии небезосновательно именуемый радарным. Этот метод, с одной стороны, обеспечивает минимальный контакт измерительного устройства с контролируемой средой, а с другой стороны – практически полностью нечувствителен к изменению ее температуры и давления. Причем и температура, и дав-

ление могут иметь значения, недопустимые для применения других методов, в первую очередь контактных.

Безусловно, уникальность возможностей не может не сказываться на цене приборов. Но прогресс в этой области настолько велик, а преимущества метода столь очевидны, что можно достаточно уверенно прогнозировать очень широкое распространение *радарных систем контроля уровня* уже в самом недалеком будущем.

При всех существующих различиях общим остается принцип действия: излученный СВЧ-сигнал отражается от контролируемого объекта, принимается обратно и соответствующим образом обрабатывается (рис. 2.79).

Результатом обработки является значение того или иного параметра объекта: дальность, скорость, направление движения и т. д. Вне зависимости от используемого принципа в радарных уровнемерах применяются СВЧ-сигналы с несущей частотой, лежащей в диапазоне от 5,8 до 26 ГГц.



Рис. 2.79. Схема измерения уровня радарным уровнемером

### Радарные системы контроля уровня

В настоящее время в радарных системах контроля уровня применяются преимущественно две технологии: с непрерывным частотно-модулированным излучением (*FMCW* – *Frequency Modulated Continuous Wave*) и импульсным излучением сигнала.

Технология *FMCW* реализует косвенный метод измерения расстояния. Уровнемер излучает микроволновый сигнал, частота которого изменяется непрерывно по линейному закону между двумя значениями  $f_0$  и  $f_1$  (рис. 2.80). Отраженный от поверхности контролируемой среды (жидкость, сыпучий материал) сигнал принимается той же антенной и обрабатывается. Его частота сравнивается с частотой сигнала, излучаемого в данный момент времени. Значение разности частот ( $\Delta f$ ) прямо пропорционально расстоянию до поверхности (1).

Принцип очень прост, но на пути его практической реализации существует множество технических и технологических проблем. Одной из важнейших, непосредственно влияющих на точность измерения, является обеспечение высокой линейности изменения частоты сигнала и особенно ее температурной стабильности, поскольку уровнемеры, как правило, предназначены для эксплуатации в очень широком температурном диапазоне.

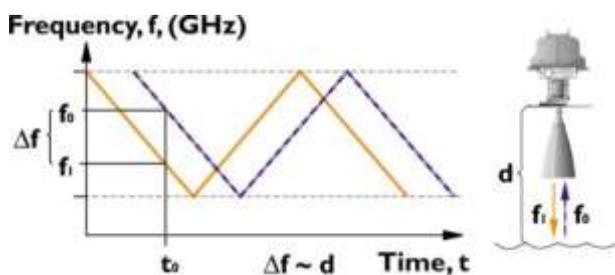


Рис. 2.80. Принцип измерения расстояния при использовании технологии *FMCW*: излученный сигнал; отраженный сигнал

Идеальными для уровнемера *FMCW* являются условия, когда поверхность контролируемой среды имеет достаточно большую

площадь, на ней отсутствуют какие-либо возмущения, а сам резервуар полностью свободен от каких-либо внутренних конструктивных элементов. Однако реальные условия разительно отличаются от идеальных и приносят дополнительные проблемы, связанные с образованием большого числа паразитных эхо-сигналов от элементов конструкции, неровностей поверхности (особенно при контроле сыпучих материалов) и т. п.

Кроме того, прием и передача сигнала осуществляются одновременно. В результате на входе приемника уровнемера присутствует сложная смесь сигналов с очень большим разбросом по амплитуде.

Для выделения частот эхо-сигналов применяется алгоритм, основанный на методе быстрого преобразования Фурье. Для его реализации требуются значительные вычислительные ресурсы и относительно продолжительное время. Выделять полезный эхо-сигнал и игнорировать остальные позволяет специальное программное обеспечение, установленное на сервисном компьютере или встроенное в уровнемер.

В радарх импульсного типа используется метод определения расстояния, основанный на непосредственном измерении времени прохождения СВЧ-импульса от излучателя до контролируемой поверхности и обратно. В результате для отраженного сигнала применение процедуры быстрого преобразования Фурье не требуется. Однако время прохождения сигналом дистанции в несколько метров составляет всего единицы наносекунд. Поэтому для обеспечения измерения столь малых значений с требуемой точностью все-таки требуется применение специальных методов обработки сигнала. Для этого обычно используется преобразование СВЧ-сигнала в сигнал промежуточной частоты ультразвукового диапазона. После такого преобразования к обработке сигналов радарного уровнемера могут быть легко применимы методы и алгоритмы, используемые в ультразвуковых приборах контроля уровня. Радарные уровнемеры импульсного типа обладают рядом преимуществ перед устройствами, использующими технологию *FMCW*.

Во-первых, принимаемые эхо-сигналы вне зависимости от природы их источника разнесены во времени, что обеспечивает их более простое разделение.

Во-вторых, среднее энергопотребление импульсных уровней составляет единицы мкВт (пиковая мощность при излучении СВЧ-импульса составляет около  $1 \text{ мВт}$ ), что позволяет использовать для их подключения двухпроводную схему с питанием от измерительной цепи со стандартным токовым сигналом  $4\text{-}20 \text{ мА}$ ; в приборах, работающих по технологии *FMCW*, энергопотребление существенно выше из-за непрерывного характера излучения, а также постоянно выполняемой математической обработки эхо-сигнала.

И в-третьих, в импульсных уровнемерах электроника для выполнения первичной обработки сигнала проще, а сама обработка выполняется исключительно аппаратными средствами; в результате благодаря меньшему числу комплектующих надежность прибора получается потенциально выше.

Конструкция одного из типов *радарного уровнемера* представлена на *рис. 2.81*.



Рис. 2.81. Конструкция радарного уровнемера:  
электронный блок, дисплей, распределительная коробка,  
кабельные вводы, крепежное приспособление, антенна

Одним из самых важных элементов *радарного уровнемера* является его антенная система. Именно от антенны зависит, какая часть излученного сигнала достигнет поверхности контролируемого

материала и какая часть отраженного сигнала будет принята и передана на вход электронного блока для последующей обработки.

В радарных системах контроля уровня преимущественно используются антенны пяти типов: *рупорная*; *стержневая*; *трубчатая*; *параболическая*; *планарная*.

*Стержневая* и *рупорная* антенны (рис. 2.82а,б) наиболее широко используются в составе приборов, предназначенных для контроля уровня в технологических установках.

*Трубчатые* антенны применяются в тех случаях, когда выполнение измерения посредством *рупорной* или *стержневой* антенны связано с очень большими трудностями или просто невозможно, например, при наличии пены, сильного испарения или высокой турбулентности контролируемой жидкости.



Рис. 2.82. Типы антенн радарных уровнемеров (слева - направо):  
а – стержневая; б – рупорная; в – параболическая;  
г – планарная

*Параболические* и *планарные* антенны (рис. 2.82в, г) используются исключительно в составе систем коммерческого учета нефтепродуктов.

При контроле уровня в закрытых емкостях, а это наиболее частое применение *радарных уровнемеров*, антенна, находясь внутри резервуара, подвергается воздействию всех неблагоприятных факторов, которые там только могут присутствовать.

К ним относятся и высокое давление, и высокая температура, и агрессивные испарения, и пыль, и т. д. Безусловно, конструкция антенны и материалы, используемые для ее изготовления, должны всему этому успешно противостоять. Кроме того, конструкция самих резервуаров отличается огромным разнообразием и потому способна создать массу проблем при установке уровнемера.

#### 2.4.11. Волноводные уровнемеры

Данный тип уровнемеров относится к уровнемерам контактного типа. Принцип действия *волноводного уровнемера* основан на технологии рефлектометрии с временным разрешением *TDR (Time Domain Reflectometry)*. Микроволновые радиоимпульсы малой мощности направляются вниз по зонду, погруженному в технологическую среду, уровень которой нужно определить (рис. 2.83).

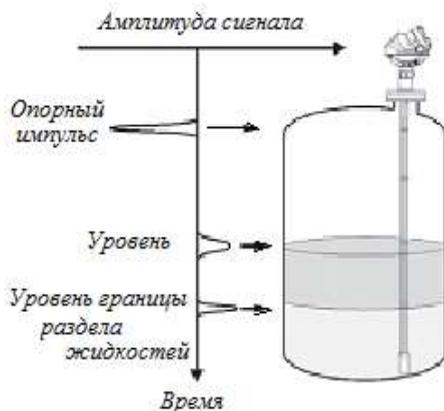


Рис. 2.83. Схема измерения уровня волноводным уровнемером

Когда радиоимпульс достигает среды с коэффициентом диэлектрической проницаемости, отличной от проницаемости газа над поверхностью среды, то из-за разности коэффициентов диэлектрических проницаемостей происходит отражение микроволнового сигнала в обратном направлении. Временной интервал между моментом передачи зондирующего импульса и моментом приема эхосигнала пропорционален расстоянию до уровня контролируемой среды.

Аналогичным образом измеряется расстояние между датчиком и границей раздела двух жидких сред с различными коэффициентами диэлектрической проницаемости. Интенсивность отраженного сигнала зависит от диэлектрической проницаемости среды. Чем выше диэлектрическая проницаемость, тем выше интенсивность отраженного сигнала.

Волноводная технология имеют ряд преимуществ по сравнению с другими методами измерения уровня, поскольку радиоимпульсы практически невосприимчивы к составу среды, атмосфере резервуара, температуре и давлению. Поскольку радиоимпульсы направляются по зонду, а не свободно распространяются в пространстве резервуара, то волноводная технология может с успехом применяться для малых и узких резервуаров, а также для резервуаров с узкими горловинами. В случае необходимости съемная голова датчика позволяет заменять модуль электроники, не нарушая герметичности резервуара, что может быть важно при измерении уровня сжиженных газов и аммиака.

*Волноводный уровнемер (рис 2.84)* включает следующие основные элементы: корпус, электронный модуль, фланцевое или резьбовое соединение с резервуаром и зонд.



Рис. 2.84. Волноводный уровнемер

Корпус уровнемера, состоящий из двух независимых отсеков (отсек электроники и клеммный отсек для подключения кабелей), может быть снят с зонда, при этом открывать резервуар не требуется. Кроме того, корпус такой конструкции повышает надежность и безопасность уровнемера при эксплуатации в опасных производствах. Электронный модуль излучает электромагнитные импульсы, которые распространяются по зонду, выполняет обработку отраженного (принятого) сигнала и выдает информацию в виде аналогового или цифрового сигнала на встроенный жидкокристаллический индикатор или в систему измерения.

В зависимости от условий технологического процесса используется один из пяти типов зондов: *коаксиальный, жесткий двухстержневой, жесткий одностержневой, гибкий двухпроводный и гибкий однопроводный*. Выбор зонда обуславливается свойствами среды (плотность, вязкость, агрессивность), уровень которой необходимо измерить (рис. 2.85).



а) б) в) г)

Рис. 2.85. Типы зондов волноводных уровнемеров:

- а – коаксиальный; б – жесткий двухстержневой;  
в – жесткий одностержневой; г – гибкий однопроводный

*Коаксиальный зонд (рис. 2.85а)* – оптимальное решение для измерения уровня внешней поверхности и уровня раздела двух жидкостей, например, растворителей, спиртов, водных растворов, сжиженных газов и жидкого аммиака.

*Коаксиальный зонд* обеспечивает самое высокое отношение сигнал/шум. Рекомендуется для измерения уровня жидкостей с низкой диэлектрической проницаемостью, а также для измерений в условиях турбулентности, в присутствии пены или потоков жидкости или пара вблизи зонда (оболочка *коаксиального зонда* работает как успокоительный колодец).

Он может использоваться в условиях электромагнитных помех, допускается контакт зонда с металлическими конструкциями. Не рекомендуется для сред, склонных к кристаллизации или налипанию, а также для порошков. Максимальный диапазон измерений при использовании *коаксиального зонда* составляет 6 м.

*Двухстержневой жесткий (рис. 2.85б) или двухпроводной гибкий зонды* рекомендуются при измерении уровня жидкостей (нефтепродукты, растворители, водные растворы и т. п.).

Возможно применение волноводных уровнемеров для измерения уровня и раздела жидких сред. Могут применяться с более вязкими жидкостями, чем рекомендовано для коаксиального зонда, однако не следует применять этот зонд для липких продуктов, когда существует вероятность налипания и образования перемычек между двумя стержнями или проводами зонда.

*Двухстержневой зонд с жесткими стержнями* подходит для измерений в диапазоне до 3 м. Для гибкого двухпроводного зонда диапазон измерений до 23,5 м.

*Одностержневой жесткий (рис. 2.85в, г) или однопроводной гибкий зонды* менее восприимчивы к налипанию среды и образованию наростов. Они могут применяться для вязких жидкостей, взвесей, водных растворов и алкогольных напитков, а также использоваться для санитарных целей в пищевой и фармацевтической промышленности. Можно использовать для измерения уровня твердых частиц, гранул и порошков, например, зерна, песка, сажи и т. п. Применяются для измерения уровня вязких жидкостей, например, сиропа, меда и т. п., а также водных растворов.

*Одностержневой зонд* рекомендуется для измерений в диапазоне до 3 м, а однопроводный гибкий - до 23,5 м.

#### **2.4.12. Сигнализаторы уровня [71]**

*Концевые выключатели* предельного уровня (*сигнализаторы уровня*) формируют выходной сигнал в тех случаях, когда уровень контролируемого материала достигает, поднимается выше или опускается ниже определенного уровня, заданного относительно высоты установки датчика. Примерами могут служить: защита от переполнения, защита оборудования от режима «сухого хода», проверка минимального и максимального уровней заполнения резервуаров.

Для определения предельного уровня существуют следующие средства контроля: поплавковые выключатели, концевые выключатели с вибрирующим чувствительным элементом, кондуктометрические выключатели, емкостные зонды, погружные магнитные зонды.

В табл. 2.12 представлены основные типы средств определения предельного уровня и области их применения.

Таблица 2.12

### Средства контроля уровня

Определение предельного уровня	Жидкости	Сыпучие материалы
Поплавковые выключатели	Да	Нет
Вибрационные концевые выключатели	Да	Да
Кондуктометрические выключатели	Да	Нет
Емкостные выключатели	Да	Да
Магнитные погружные зонды	Да	Нет

#### ***Поплавковые сигнализаторы уровня***

*Поплавковые сигнализаторы* обладают необходимой плавучестью, позволяющей им в незакрепленном состоянии находиться на поверхности жидкости в строго горизонтальном положении. В конкретных применениях поплавковый датчик закрепляется посредством собственного кабельного зажима на высоте, соответствующей предельному уровню жидкости.

Процесс переключения запускается качанием датчика, когда он отклоняется от горизонтального положения в любом направлении, как это представлено на *рис. 2.86*.



Рис. 2.86. Пример типового поплавкового сигнализатора

В качестве коммутационных устройств часто применяются жидкометаллические микровыключатели, в которых в настоящее время вместо ртути используется *галинстан* (*Galinstan* – жидкий металлический сплав, включающий галлий, индий и олово и сохраняющий жидкое состояние при температурах выше  $-19^{\circ}\text{C}$ ). Поплавковый выключатель состоит из корпуса поплавка со встроенным микровыключателем и присоединительного кабеля.

Современные поплавковые датчики используют три разновидности не содержащих ртути коммутационных устройств:

- шаровой микровыключатель с определением положения на основе индуктивного метода;
- шаровой концевой микровыключатель;
- микровыключатель, использующий жидкий металлический сплав *Galinstan*.

В качестве *поплавков* применяют преимущественно полые шаровидные или сферо-цилиндрические тела, выполненные из полипропилена, устойчивого к воздействию неконцентрированных кислот и щелочей, большинства растворителей, спирта, бензина, воды, консистентных смазок и масел.

На *рис. 2.87* представлено регулируемое комбинированное устройство из поплавковых выключателей, позволяющее изменять уровни срабатывания выключателей, если этого потребуют новые эксплуатационные условия.

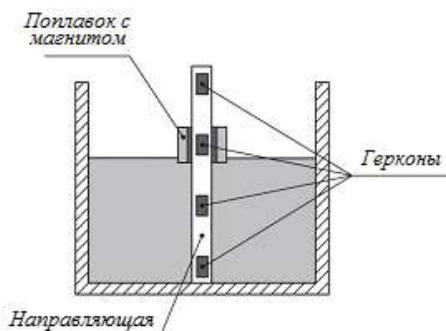


Рис. 2.87. Схема реализации регулируемого комбинированного устройства с поплавковыми выключателями

В этом сигнализаторе поплавки настраиваются по концу несущей штанги. Подстройка по уровням срабатывания производится пользователем на месте применения посредством перемещения установочных фиксирующих колец.

Основные *достоинства* метода: простота; прочность; невысокая стоимость.

*Недостатки*: непригодны для клейких жидкостей; проблемы с плещущимися жидкостями; плавучесть зависит от размеров поплавка; точка срабатывания зависит от колебаний плотности среды.

### ***Вибрационные сигнализаторы уровня***

В качестве вибрационных концевых выключателей применяют устройства с резонатором камертонного типа (из-за формы его часто называют колебательной вилкой), в которых пьезоэлектрическим способом возбуждаются сильные механические колебания в диапазоне резонансных частот.

Внешний вид *вибрационного датчика* представлен на *рис. 2.88*. Благодаря высоким механическим качествам вибрирующей системы вполне достаточна весьма малая мощность возбуждения.

Размещение чувствительного элемента внутри контролируемой среды вызывает резкое уменьшение амплитуды колебаний вплоть до их полного гашения. Смена состояния колебания состоянием покоя или, наоборот, в виде электрического сигнала предельного уровня поступает на индикатор. При этом функционирование данных устройств не зависит от флуктуаций физических свойств контролируемого вещества.

*Вибрационные концевые выключатели* можно использовать для определения предельного уровня практически всех жидкостей и сыпучих материалов.

Основные *достоинства* метода: простота; не требуется регулировка в месте установки; отсутствуют движущиеся части; нечувствительны к турбулентности, образованию пены и внешней вибрации; допускают любую пространственную ориентацию; нечувстви-

тельны к большинству физических свойств измеряемого вещества (исключение - плотность); проверка функционирования может проводиться на месте монтажа.



Рис. 2.88. Внешний вид типового вибрационного сигнализатора

*Недостатки:* клейкие вещества и твердые частицы в жидкостях могут служить причиной отказов; твердые частицы могут заклинивать колебательную вилку.

### ***Кондуктометрические сигнализаторы уровня***

Этот метод основан на изменении силы тока. При пустом резервуаре сопротивление между двумя электродами бесконечно велико; при погружении концов электродов в проводящую среду сопротивление уменьшается соответственно величине ее проводимости. Область применения метода распространяется исключительно на контроль уровня проводящих жидкостей.

Уровень сыпучих или вязких материалов измерять указанным методом нельзя. Необходимо наличие у контролируемого вещества определенной минимальной проводимости (более  $10^{-6}$  Ом/см), чтобы при измерении уровня кондуктометрическим методом можно было получить различимый сигнал изменения тока.

Настоящий метод применяют главным образом для измерения предельного уровня в цистернах, баках и паровых котлах. Воспламеняющиеся жидкости, такие как различные виды топлива, масла

и растворители, являются диэлектриками, поэтому для них этот метод неприменим в отличие от кислот, щелочей и растворов, содержащих воду и являющихся проводниками. Уровень агрессивных жидкостей определяется без проблем, путем использования электродов, выполненных из высокопрочных материалов. Внешний вид кондуктометрического концевого выключателя представлен на *рис. 2.89*.

При реализации кондуктометрического метода два электрода устанавливаются выше поверхности проводящей жидкости, уровень которой контролируется.

Когда жидкость достигает той точки, где оба электрода контактируют с жидкостью, электрический ток вызывает срабатывание реле. Если требуется выявить несколько значений уровня, используется соответствующее кратное число электродов. Для того чтобы исключить такие эффекты, как электролиз жидкости или взрыв, применяются постоянный ток достаточно малой величины и переменный ток.

На основе данного метода может быть легко и экономично реализовано определение не только предельного, но и межфазного уровня; например, достаточно просто выявляется граница между водой и непроводящими жидкостями в разделителях (сепараторах) масла или бензина.

Основные *достоинства* метода: простота и прочность; отсутствие движущихся механических частей; нечувствительны к турбулентности; технологическим процессом допускаются высокая температура и давление; простая регулировка и обслуживание.



Рис. 2.89. Внешний вид типового кондуктометрического концевого выключателя

*Недостатки:* непригодны для клейких веществ и диэлектриков; масляные вещества могут вызывать налипание на электроды тонкого слоя непроводящего покрытия, что может быть причиной отказа.

### ***Емкостные сигнализаторы уровня***

Название метода предполагает, что в его основе лежит определение изменений электрической емкости в зависимости от уровня наполнения резервуара. Конденсатор образован стенкой резервуара и щупом, погруженным в его содержимое.

Измерение емкости осуществляют, как правило, при помощи резонансных схем или мостов переменного тока с самоуравновешиванием. В точном определении уровня решающую роль играют конструкция, изоляция и правильное размещение емкостного зонда. Поэтому необходимо учитывать следующие факторы: изоляцию зонда, форму резервуара, давление в резервуаре, температуру контролируемого материала, его зернистость, абразивность, химическую агрессивность, вязкость, возможность образования конденсата или пены.

Измерительный зонд в зависимости от требуемой длины выполнен из проволочного тросика, металлического стержня или емкостного конечного выключателя. Внешний вид емкостного сигнализатора трубки представлен на *рис. 2.90*. Основные *достоинства* метода: простота установки и эксплуатации; многофункциональность применения; возможность использования с клейкими веществами; активная компенсация влияния раскачивания зонда.

Магнитные погружные зонды предельного уровня разработаны для использования в очищенных жидкостях, таких как вода, растворители, масла, различные виды топлива. В зависимости от вида контролируемой жидкости возможны различные исполнения зондов:

- пластиковые для агрессивных кислот и щелочей;
- из нержавеющей стали для воды, масел и т. п.;

- из нержавеющей стали во взрывозащищенном исполнении для горючих жидкостей, таких как топливо, растворители, спирты.



Рис. 2.90. Внешний вид емкостного сигнализатора

### ***Магнитные сигнализаторы уровня***

Эти датчики работают следующим образом: поплавок, направляемый трубкой зонда, плавает на поверхности жидкости; торoidalный магнит, смонтированный на поплавке, в соответствующем положении замыкает язычковые герметизированные контакты, установленные на направляющей трубке, посредством магнитного поля. Внешний вид магнитного погружного зонда представлен на *рис. 2.91*.



Рис. 2.91. Внешний вид магнитного погружного зонда

Основные *достоинства* метода: простой принцип действия; несложный монтаж; несложное техническое обслуживание.

*Недостатки*: плавучесть зависит от размера поплавка; точки переключения зависят от плотности среды; максимальная длина зонда - около 6 м; минимально допустимая плотность контролируемой среды равна  $0,7 \text{ г/см}^3$ ; можно использовать только в очищенных жидкостях.

### ГЛАВА 3. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И СИСТЕМ

Перед современной теплоэнергетикой стоят задачи обеспечения надежной, безопасной и экономичной работы оборудования тепловых и атомных электростанций. Важным направлением повышения эффективности теплоэнергоустановок является оптимизация систем управления технологическими процессами.

Отечественный и зарубежный опыт эксплуатации энергопредприятий свидетельствует о необходимости создания и совершенствования автоматизированных систем управления технологическими процессами. Все более глубокая и всесторонняя автоматизация теплоэнергетических объектов требует наукоемких технологий и выдвигает большую энергетику на передний край научно-технического прогресса.

В 30-40-е годы XX века автоматизация теплового оборудования на ТЭС и в котельных проводилась, в основном, с помощью электромеханических регуляторов, представляющих собой единую конструкцию. Жесткая структура таких устройств, наличие большого числа электрических контактов и подвижных частей в цепях управления исполнительными механизмами препятствовали решению сложных задач управления и созданию надежных автоматических систем регулирования.

Трудоемкие процессы, связанные с производством и распределением тепловой и электрической энергии, были в основном механизированы, но труд оператора состоял в том, чтобы *«вручную»* управлять машинами, механизмами и установками и наблюдать за их работой непосредственно или по контрольно-измерительным приборам. Все это и обусловило необходимость активного развития и внедрения автоматизации процессов в теплоэнергетике. И даже полная механизация работающего энергетического оборудования не избавляла оператора от круглосуточного утомительного и однообразного труда, необходимости включать или отключать оборудо-

вание, перемещать регулирующие органы и т. п., и, более того, не гарантировала надежной и экономичной работы теплоэнергетических систем даже при высокой квалификации эксплуатационного персонала.

В 50-е годы XX века благодаря развитию полупроводникового приборостроения и отраслей промышленности, выпускающих электронную технику и малогабаритную аппаратуру управления, в энергетике стали широко применяться автоматические регуляторы тепловых процессов нового типа, состоящие из отдельного первичного прибора с выходным электрическим сигналом, электронного регулирующего прибора и отдельно расположенного исполнительного механизма с независимым дистанционным управлением. Это позволило разместить раздельно, в соответствии с их функциональным назначением: первичный прибор и исполнительный механизм на объекте, а регулирующий прибор и органы управления – на оперативном щите.

Вместе с тем в энергетике мощности агрегатов растут, количество контролируемых параметров и точек входа сигналов измерений также растет, достигая в 60–70-х годах XX века 500–2000 точек входа на каждом предприятии теплоэнергетики. Разработанные ранее технические средства автоматизации в этих условиях становятся малопригодными. В это же время происходит качественный скачок и в развитии электроники и микропроцессорной техники. Появились датчики и преобразователи с нормированными выходными сигналами. Происходит бурное развитие средств вычислительной техники (электронно-вычислительные машины и микропроцессорные средства). Вычислительные машины стали использовать для сбора и переработки информации о работе промышленных объектов. С помощью вычислительных машин оказалось возможным решение задач и по выдаче результатов в виде советов оператору или управляющих сигналов машинам, рабочим механизмам и установкам. В результате значительная часть функций по управлению и контролю сложными технологическими процессами стала передаваться вычислительной машине, в том числе массовый контроль

и сигнализация, расчет технико-экономических показателей отдельных агрегатов и производства в целом, оптимизация некоторых режимов работы оборудования и т. п.

Все это обеспечило развитие систем автоматического регулирования технологических процессов, автономных систем дистанционного управления и обеспечения безопасности энергетического оборудования, так называемых автоматизированных систем управления технологическими процессами систем (АСУ ТП). Такие АСУ ТП, независимо от вида технологического процесса, которым они управляют, представляют собой систему «человеко-машинный» комплекс, выполняющий сбор и переработку информации для выработки и реализации управляющих воздействий на технологический объект в соответствии с принятыми критериями управления. При этом оперативно-диспетчерское управление энергооборудованием и контроль наиболее ответственных параметров в АСУ ТП остаются за оперативным персоналом, эффективно использующим технические средства автоматизации.

Автоматизация теплоэнергетического оборудования осуществляется с помощью средств (системы управления), выполняющих следующие функции:

- автоматический контроль (измерения) текущих значений параметров технологического процесса;
- технологическая сигнализация о состоянии основного и вспомогательного оборудования;
- автоматическая защита основного и вспомогательного оборудования от возможных повреждений в процессе эксплуатации;
- дистанционное управление машинами и механизмами на расстоянии;
- автоматическое непрерывное регулирование технологических процессов и управление основными и вспомогательными механизмами;

- автоматическое дискретное управление включением или отключением регуляторов, машин, механизмов и установок в заданной последовательности.

Перечисленные функции выполняются подсистемами управления.

Человек-оператор и подчиненные ему подсистемы должны управлять технологическими процессами и поддерживать такие значения технологических параметров, которые обеспечивают максимально возможные технико-экономические показатели установок. Эти подсистемы, подчиненные оператору, при использовании вычислительных машин образуют автоматизированную систему управления технологическими процессами объектов, например, АСУ ТП энергоблока на тепловой электростанции, АСУ ТП парового (водогрейного) котла, АСУ ТП пароводогрейной котельной и т. п. [1].

### **§ 3.1. Структура средств автоматизации**

Автоматизацией любого механизированного производства называют управление машинами, механизмами и установками и контроль за их работой с помощью специальных устройств (от простейших автоматов до современных управляющих вычислительных машин) без участия человека или при ограниченном его участии. Фактически под автоматизацией следует понимать правильное безаварийное ведение того или иного технологического процесса без участия персонала (или при его ограниченном участии).

Выполнение автоматизации того или иного технологического процесса на действующем оборудовании подразумевает наличие всех необходимых средств автоматизации, образующих определенную структуру.

Структура средств автоматизации включает в себя следующие элементы:

- средства автоматического контроля всех технологических параметров процесса (информационный контроль);
- средства сигнализации и автоматической защиты;
- автоматические блокировки;
- средства дистанционного управления;
- средства автоматического регулирования и управления.

Автоматический контроль параметров подразумевает измерение тех величин, которые характеризуют правильное ведение технологического процесса, а также тех величин, которые необходимо регулировать.

### **§ 3.2. Общие положения теории автоматического управления [2]**

#### ***Формализация задачи управления***

Чтобы решить задачу компьютеризованного управления, необходимо определить объект управления и описать его формально, то есть на языке математики. Оставим в стороне социальные, психологические и другие гуманитарные аспекты управления, которые оказывают влияние на некоторые коэффициенты уравнений или приводят к появлению некоторых очевидных ограничений, и будем рассматривать лишь формальные стороны управления, позволяющие решать задачу управления сложным объектом с помощью ЭВМ.

#### **3.2.1. Обобщенная схема системы управления**

*Объектом управления* будем называть ту часть окружающего мира, состояние которой нас интересует, и на которую мы можем воздействовать целенаправленно, т. е. управлять ею.

Существуют эффективные математические методы синтеза управления, опирающиеся на определенные модели идентификации, планирования экспериментов, математического программиро-

вания и экспертные методы. Сочетание этих подходов и образует основу для управления сложными объектами, каковым являются, в частности, и процессы диагностики и лечения. Под управлением при этом будем понимать организацию такого целенаправленного воздействия на объект (больного), в результате которого объект переходит в требуемое состояние (выздоровливает), а *объектом* управления будем называть ту часть рассматриваемого процесса диагностики и лечения, на которую мы можем воздействовать целенаправленно, т. е. управлять.

Обозначим буквой  $X$  воздействие на объект (это вход объекта), а буквой  $Y$  - состояние объекта (это его выход). На *рис. 3.1* объект изображен в виде прямоугольника. Например, если объектом управления является процесс диагностики и лечения, то  $X$  определяет состояние его среды, то есть исходное состояние больного;  $Y$  - состояние больного после лечения.



Рис. 3.1. Взаимодействие объекта со средой

Состояние объекта  $Y$  зависит от характера воздействия на объект  $X$ , т. е. между ними имеется какая-то связь, вид которой пока может быть и неизвестен, но ее можно представить в виде формулы:

$$Y = F^{\circ}(X), \quad (3.1)$$

где  $F^{\circ}$  обозначает связь между входом и выходом объекта. Эту связь в математике называют *функцией* или *оператором управления*. Таким образом, в самом общем случае  $F^{\circ}$  является неизвестным пока оператором, связывающим вход  $X$  и выход  $Y$  объекта. Этот оператор характеризует специфику объекта с точки зрения управления.

Говоря об управлении как о целенаправленном процессе, нельзя не обратить внимание на то, чьи цели реализуются в процес-

се управления, т. е. кому нужно это управление. Поэтому совершенно необходимо ввести в рассмотрение определение *субъекта*, который является источником целей (постановка диагноза), реализуемых управлением. Под *субъектом* можно подразумевать конкретную личность (например, врач), но это может быть и группа людей, объединенная по некоторому признаку, и даже все человечество, если рассматривается управление глобальными объектами, такими, как окружающая среда или космос. Выделение при анализе управления субъекта необходимо для понимания того, как формируются цели управления (назначенное лечение). Так как фигура субъекта важна для управления, выделим его из среды, как это показано на *рис. 3.2*.

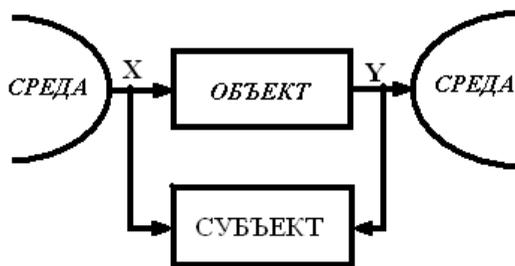


Рис. 3.2. Схема взаимодействия субъекта со средой и объектом

Субъект находится в той же среде, что и объект, т. е. воспринимает состояние  $X$  среды. Одновременно, и это самое главное, на него влияет состояние  $Y$  объекта. Если состояние  $Y$  объекта удовлетворяет потребностям субъекта, взаимодействующим с этим объектом, то никакого управления не нужно. Если же это состояние не устраивает субъекта, то ему необходимо организовать такое воздействие на объект, которое переведет его в новое состояние, удовлетворяющее субъекта. Это воздействие и есть управление.

Субъект всегда формулирует свою цель, реализация которой в объекте приведет, по мнению субъекта, к удовлетворению его потребностей. То есть цель представляет собой набор требований, предъявляемых субъектом к состоянию объекта.

Обозначим *цель управления*  $Z^*$  (звездочкой будем обозначать все желаемое). Цель определяет, каким должен быть объект с точки зрения того, кто объявляет цель, то есть с точки зрения субъекта. Проверить выполнение цели  $Z^*$  в объекте можно только по его состоянию  $Y$ , но для этого состояние  $Y$  объекта следует выразить на языке целей субъекта, т. е. выполнить преобразование

$$Z = \Psi(Y). \quad (3.2)$$

В частном случае может оказаться, что  $Y = Z$ , т. е. субъект формулирует свои цели на языке состояний объекта. В нашем случае цель  $Z$  заключается в том, чтобы диагноз соответствовал болезни. В этом случае  $\Psi(Y) = Y$ , поэтому

$$Z = Z^* \quad (3.3)$$

и равенство указывает на то, что состояние объекта удовлетворяет поставленным целям. Если же

$$Z \neq Z^*, \quad (3.4)$$

то цели субъекта не реализованы в этом объекте. Последнее обстоятельство заставляет решать дилемму: либо смириться с  $Z$  и в результате терпеть определенный ущерб, связанный с не достижением своих целей  $Z^*$ , либо создать систему управления, которая реализовала бы поставленные цели  $Z^*$ , но при этом затратить определенные средства на ее создание и эксплуатацию. То есть, за управление приходится платить. Это прежде всего затраты на сбор информации об объекте, на синтез его модели, на выработку управления и его реализацию.

Создавая систему управления, необходимо, прежде всего, определить, каким образом следует воздействовать на объект, то есть определить каналы управления (некоторые из входов  $X$ ), которые поддаются целенаправленному изменению. Но часто этого бывает недостаточно и приходится создавать новые каналы управления объектом, которые до этого не существовали.

Обозначим управление буквой  $U$ . Теперь состояние объекта управления зависит от двух факторов – состояния входов ( $X$ ) и состояния управления ( $U$ ):

$$Y = F^0(X, U), \quad (3.5)$$

где  $F^0$  – по-прежнему оператор управления объектом, который теперь учитывает еще и способ реализации управления  $U$ .

Теперь можно переходить к созданию системы управления, под которой будем понимать все необходимые алгоритмы получения, обработки информации и средства их реализации, объединенные для достижения поставленных целей управления. То есть систему управления формально реализует некоторый оператор вместе с объектом, которым он управляет.

В самом общем виде схема системы управления показана на рис. 3.3. Здесь  $D_x$  и  $D_y$  – датчики, с помощью которых контролируется состояние среды и объекта.

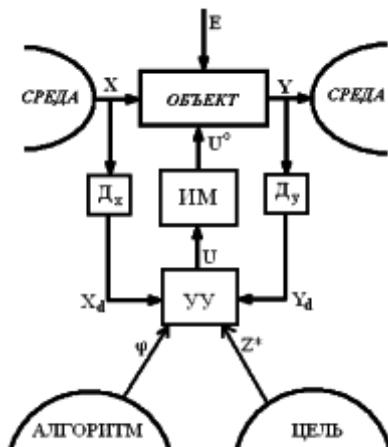


Рис. 3.3. Схема системы управления

Результаты измерений

$$X_d = D_x(X); \quad Y_d = D_y(Y), \quad (3.6)$$

где  $D_x$  и  $D_y$  – операторы этих датчиков, являются исходной информацией для управляющего устройства ( $УУ$ ), которое на этой основе вырабатывает управляющее воздействие  $U$ .

Эти формулы выражают связь между состоянием объекта и информацией об этом состоянии. А это далеко не одно и то же.

Все, что нас окружает, мы ощущаем с помощью наших пяти органов чувств и действуем (управляем) на основе этих наших ощущений. Если управление доверить ЭВМ, то для этого ее следует снабдить «органами чувств» - указанной системой датчиков  $D_x$  и  $D_y$  о состоянии среды ( $X$ ) и объекта ( $Y$ ).

Таким образом, в основе процесса управления лежит информация о сложившейся ситуации:

$$I = \langle X_d, Y_d \rangle, \quad (3.7)$$

хотя она всегда является неполной. Эта неполнота информации, прежде всего, связана с ограниченными возможностями всякой системы сбора информации  $I$  и необходимостью «платы» за эту информацию, а при ограниченных ресурсах, выделяемых обычно на управление, указанное обстоятельство приводит к постоянному дефициту информации о поведении среды и объекта.

Сказанное заставляет образовать еще один вход - ненаблюдаемое возмущение  $E$  (см. рис. 3.3), под которым подразумеваются все ненаблюдаемые внешние и внутренние факторы, влияющие на состояние техпроцесса  $Y$ . То есть

$$Y = F^0(X, U, E), \quad (3.8)$$

что уточняет формулу (1.5). Относительно входа  $E$  могут выдвигаться лишь определенные предположения, но непосредственно этот вход не контролируется. Входы  $E$  образуют прежде всего неизмеряемые параметры среды (например, температура внешней среды, дрейф характеристик средств измерений и контроля и т. п.).

Таким образом, объект управления имеет три входа: наблюдаемый ( $X$ ), управляемый ( $U^0$ ) и ненаблюдаемый ( $E$ ). Управляющее воздействие (команда, вырабатываемая управляющим устройством)  $U$  представляет собой информацию о том, в какое положение должны быть приведены управляемые входы объекта  $U^0$ . «Обработка» этой команды осуществляется исполнительными механизмами (ИМ), которые изменяют состояние управляемого входа  $U^0$  объекта. Для простоты будем предполагать, что исполнительные механизмы

мгновенно выполняют команду  $U$ , и поэтому  $U^0 = U$ , т. е. можно не различать  $U^0$  и  $U$  (случай  $U^0 \neq U$  исследуется теорией автоматического управления, а точнее теорией следящих систем, хорошо и весьма полно разработанной).

Для целенаправленного функционирования управляющего устройства ему кроме информации (3.7) необходимо сообщить *цель*  $Z^*$  управления, т. е. к чему ему следует стремиться в процессе управления, и *алгоритм управления* – указание, как добиться этой цели.

Если понятие цели интуитивно ясно – это то, к чему мы стремимся, то понятие алгоритма нуждается в пояснении. Под алгоритмом в данном случае понимается четкое и недвусмысленное правило, инструкция, указание, что и как следует делать, чтобы добиться заданной цели  $Z^*$  в сложившейся ситуации  $I$ . Тогда управление  $U$  можно представить как результат работы алгоритма:

$$U = \varphi(I, Z^*), \quad (3.9)$$

где  $\varphi$  – алгоритм управления. Для процесса обработки он представляет собой оператор  $\varphi = \varphi(\cdot, \cdot)$ , перерабатывающий информацию о заготовках, техпроцессе, изделиях и цели в управление  $U$ , реализация которого  $U^0$  должна переводить объект в требуемое состояние  $Z^*$ .

Таким образом, основными факторами управления точностью в процессе обработки, которые, вообще говоря, присущи системе управления любым объектом, являются:

- цель управления ( $Z^*$ );
- информация о состоянии объекта ( $I$ );
- воздействие на объект, т. е. собственно управление ( $U$ );
- алгоритм управления ( $\varphi$ ).

Если исключить из перечня основных факторов управления хотя бы один, управление станет невозможным.

В широком смысле управление определяется множеством целей  $\{Z^*\}$ , которые поступают в систему управления извне (фигурными скобками  $\{a\}$  всюду мы будем обозначать множество

элементов *a*). Эти цели ставит субъект, являющийся потребителем будущей системы управления объектом. Субъект выступает в качестве заказчика на создание системы управления.

### 3.2.2. Анализ и синтез системы управления

При анализе системы управления следует учитывать фактор сложности объекта управления. Дело в том, что управление простым объектом не представляет труда. Например, автоматическое управления процессом поддержания температуры на заданном (целевом) уровне, который реализуется в любом холодильнике, поскольку алгоритм управления температурой крайне прост: включить охлаждение, если температура в камере выше заданной, и выключить - если ниже или равна заданной. Вот и все!

Трудности синтеза управления определяются сложностью объекта, поэтому следует начинать именно с объекта, а не с алгоритма управления им. Что такое «*сложный объект*» управления? Рассмотрим некоторые основные черты (но неформальные признаки) сложной системы.

**1. Отсутствие математического описания и необходимость в нем** является обязательной чертой сложного объекта управления. Под математическим описанием подразумевается наличие алгоритма (правил, инструкции) вычисления состояния  $Y$  объекта по наблюдениям его входов - управляемого  $U$  и неуправляемого, но наблюдаемого  $X$ . И если простыми объектами можно управлять без их математической модели, то сложными нельзя. Так, при необходимости очень точного поддержания заданной температуры без математической модели уже не обойдешься. Требование точности делает простой объект управления сложным. Этот пример позволяет сформулировать следующее утверждение: если хочешь управлять объектом с использованием формальных методов, то придется создать его математическую модель.

**2. Стохастичность поведения** сложных объектов управления является также очень важной чертой, характеризующей трудности процессов анализа и управления ими. Эта черта обусловлена

не столько наличием каких-то специальных источников случайных помех в объекте управления, сколько сложностью объекта и связанным с этим неизбежным обилием всякого рода второстепенных (с точки зрения целей управления, разумеется) процессов. Поэтому поведение сложного объекта зачастую оказывается неожиданным для субъекта управления. Эти непредсказуемые проявления в поведении сложного объекта следует рассматривать как случайный фактор или трактовать как зашумленность, что лучше, чем разбираться в механизме второстепенных процессов, протекающих в сложном объекте.

Это относится к технологическим и многим другим объектам исследования и управления. Здесь проявляется любопытная тенденция: называть случайным то, что второстепенно и несущественно для реализации целей управления в этом объекте. В действительности, если разобраться, эта «случайность» может оказаться вовсе и не случайной. Но, однако, очень удобно считать случайным все то, что непонятно. К тому же, этот подход хорошо развит в рамках статистической теории управления (заметим, что понятия «статистический» и «стохастический» здесь эквивалентны).

**3. «Нетерпимость»** к управлению является, пожалуй, самой досадной чертой сложного объекта управления, затрудняющей управление им. Дело в том, что сложный объект существует и функционирует независимо от субъекта и его потребностей. Так, любой технологический процесс существует для производства продукции, а не для управления им. Управление имеет внешний характер по отношению к объекту. Естественно, что вследствие этого всякое управление нарушает «нормальное» функционирование объекта, т. е. изменяет его самостоятельное поведение и делает зависимым от субъекта. Особенно наглядно это обстоятельство проявляется в объектах, содержащих в себе людей или их коллективы (например, когда объектами управления являются технологический участок, цех или завод).

**4. Нестационарность** сложного объекта управления естественно вытекает из его сложности. Эта черта проявляется в дрейфе характеристик объекта, в «уплывании» его параметров, т. е. в эволюции объекта во времени. Чем сложнее объект, тем рельефнее проявляется эта его черта, что создает серьезные трудности при синтезе модели такого сложного объекта и управлении им. Чем сложнее объект, тем быстрее он меняется. В обыденной жизни с этим явлением мы сталкиваемся, наблюдая амортизацию (старение) окружающих нас вещей и предметов.

**5. Невоспроизводимость** процессов управления и объектов. Проявляется эта черта в различной реакции объекта на одну и ту же ситуацию или управление в различные моменты времени. Сложный объект все время как бы перестает быть самим собой, т. е. постоянно меняется. Этого нельзя не учитывать при синтезе модели объекта управления, для чего и вводится ее коррекция. Все эти обстоятельства приводят к тому, что цель управления таким объектом в полной мере никогда не достигается. Действительно, для синтеза управления  $U$  требуется время, за которое объект изменяется непредвиденным образом, а в результате управление уже наверняка не приведет к желаемому результату  $Z^*$ .

Эффективным способом борьбы с перечисленными свойствами сложного объекта управления является экстраполяция поведения системы, т. е. выяснение направления ее эволюции. В этом случае управление  $U$  производится с упреждением, с учетом замеченного изменения объекта. Другой способ состоит в сокращении цикла управления, чтобы за время синтеза управления объект сильно не изменился.

### **3.2.3. Основные этапы управления сложным объектом**

Созданием системы управления занимается разработчик. Однако прежде чем принять решение о создании системы управления, необходимо рассмотреть все этапы управления, независимо от того, с помощью каких материальных средств будут реализованы эти этапы. Такой алгоритмический анализ управления является основой

для принятия решения о создании системы управления и степени ее автоматизации.

Управление сложным объектом состоит из следующих этапов (рис. 3.4).

**1. Формулировка цели управления  $\{Z^*\}$ .** На этом этапе определяются цели, которые должны быть реализованы в процессе управления. Слово «цель» здесь используется в смысле некоторого предполагаемого состояния объекта, которое не реализуется естественным образом без вмешательства извне, т. е. без управления.

Поддерживать размер обрабатываемой детали  $d$  в пределах установленного допуска  $d^*$  можно только с помощью управления.

Управление может быть автоматическим или неавтоматическим (ручным), но в любом случае целью такого управления является  $Z^*$ :  $d = d^*$ . Задание множества целей  $\{Z^*\}$  в данном случае сводится к определению диапазона размеров, внутри которого могут находиться желаемые размеры  $d^*$ . Реализация автоматического управления в данном случае связана с необходимостью аппаратурной реализации алгоритма: автоматически начинать процесс обработки  $d > d^*$  и выключать его при  $d < d^*$ . Очевидно, что этот же алгоритм можно реализовать и в ручном неавтоматическом режиме обработки.

**2. Определение объекта управления.** Этот этап связан с выделением той части процесса, состояние которой нас интересует в связи с реализацией целей. Это и есть объект управления. Установленный допуск на обработку определяет объект управления, т. е. те части детали, размер которых необходимо контролировать (измерять размер) и на которые следует воздействовать (последовательно снимать с помощью режущего инструмента), чтобы выполнить заданные цели управления  $\{Z^*\}$ .

**3. Структурный синтез модели.** Для синтеза управления необходимо создать модель объекта управления. Только с помощью модели объекта можно построить некоторое управление, переводящее сложный объект в целевое состояние. Без модели процесс управления можно реализовать лишь методом проб и ошибок,

что неприемлемо, так как требует слишком больших затрат времени и сил.

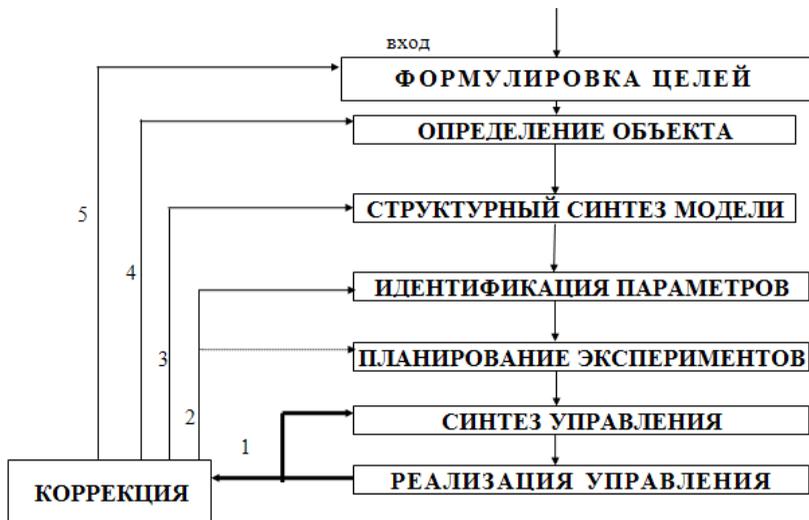


Рис. 3.4. Основные этапы реализации системы управления

На этом этапе определяется вид зависимости  $F$  без учета значений ее параметров. Под моделью объекта управления будем понимать зависимость  $F$ , связывающую состояние объекта  $Y$  с его входами – неуправляемым  $X$  и управляемым  $U$ :

$$Y = F(X, U). \quad (3.10)$$

В отличие от оператора объекта  $F^0$  в (3.5), который неизвествен, модель  $F$  представляет собой высказывание относительно связи между входами  $X$  и  $U$  модели и ее выходом на любом удобном языке.

В общем случае модель  $F$  определяется некоторым алгоритмом (правилом, инструкцией), который указывает, как, располагая информацией о входах  $X$  и  $U$ , определить выход  $Y$ , не обращаясь к реальному объекту.

Процесс синтеза модели объекта обычно происходит в три этапа.

Произведем условно следующую операцию: «расщепим» модель  $F$  на ее структуру  $St$  и параметры  $c_1, \dots, c_k$ , т. е. представим модель в виде пары:

$$F = \langle St, C \rangle, \quad (3.11)$$

где  $C = (c_1, \dots, c_k)$  – вектор параметров модели (векторы всюду будем обозначать полужирными буквами).

На этапе структурного синтеза определяется лишь структура  $St$  модели, а конкретными значениями параметров  $C$  не интересуются. Под структурой в общем случае принято понимать вид элементов, из которых состоит объект, и отношений между элементами.

Описывать структуру удобнее всего графом, вершины которого – элементы объекта, а дуги – отношения, в которые вступают элементы объекта. Так, завод как объект управления состоит из цехов, отделов, служб и т. д. (это его элементы), связанных между собой отношениями подчиненности, материальных и информационных потоков и т. д.

Структура объекта управления может быть различной в зависимости от целей управления. Например, один и тот же объект-завод имеет различную структуру в зависимости от целей управления. Так, с точки зрения целей министерства завод является преобразователем выделяемых фондов (денежных и материальных) в готовую продукцию. Работники завода (обеспечивающие тот или иной технологический процесс) рассматривают его как преобразователь их труда в зарплату (намеренно упрощенная схема). Медицинские учреждения относятся к тому же заводу как к источнику всякого рода производственных травм и профессиональных заболеваний, а санитарная служба считает, что завод производит отходы, загрязняющие среду. То есть, существует определенное разнообразие взглядов и, следовательно, структур конкретной модели объекта управления.

Линейность, статичность, детерминированность, дискретность и т. д. являются структурными категориями. Линейная, статическая, непрерывная, детерминированная структура процесса обработки однозначно определяет для него следующий вид для F:

$$Y = F(X, U) = c_0 + c_1X + c_2U, \quad (3.12)$$

где конкретные значения параметров  $c_0, c_1, c_2$  пока не важны, важен лишь вид зависимости F, то есть линейность структуры.

На этапе структурного синтеза определяется лишь вид и характер модели F, а параметры C определяются на последующих двух этапах управления.

**4. Идентификация параметров модели объекта** связана с определением численных значений параметров  $C = (c_1, \dots, c_k)$  в режиме нормального функционирования, то есть без организации специальных управляющих воздействий на объект.

Исходной информацией для идентификации являются структура  $St$  и наблюдения  $I$  за поведением входа  $X(t)$  и выхода  $Y(t)$  объекта в процессе обработки.

Таким образом, пара

$$I(t) = \langle X(t), Y(t) \rangle \quad (3.13)$$

является в общем случае основным источником информации при идентификации.

Искусство идентификации – это искусство пассивного наблюдения. Таково основное кредо науки: наблюдать не вмешиваясь. На это есть свои основания, так как всякое вмешательство искажает естественный ход наблюдаемого явления. Более того, результаты эксперимента некоторым образом предопределяются его целями. Очень часто в эксперименте мы получаем не то, что есть, а, грубо говоря, то, что хочется, и связано это не с недобросовестностью экспериментатора, а с психологией процесса познания. Именно поэтому наблюдение является эффективным инструментом познания.

Как легко заметить, информация (3.13) позволяет определить зависимость состояния объекта лишь от входа X:  $Y = F(X)$ , которая отличается от искомой модели (3.10). Для выяснения зависимости

выхода  $Y$  объекта от управляемых входов  $U$  необходимо преднамеренно их изменять, то есть «поэкспериментировать» с объектом. Однако, как сказано выше, сложный объект «не любит» экспериментов, нарушающих режим его нормального функционирования. Поэтому эксперимент, которого нельзя избежать, следует проводить, минимально возмущая объект, но так, чтобы получить при этом максимальную информацию о влиянии варьируемых параметров на выход объекта.

Этому служит следующий этап – планирование экспериментов.

**5. Планирование экспериментов.** На этом этапе главным является синтез плана эксперимента, позволяющего с максимальной эффективностью определить параметры модели объекта управления.

Для статического объекта этот план  $\hat{U}$  представляет собой набор состояний управляемого входа объекта:

$$\hat{U} = \langle U_1, \dots, U_N \rangle, \quad (3.14)$$

а для динамического – план-функцию

$$\hat{U} = U(t), \quad 0 \leq t \leq T, \quad (3.15)$$

то есть программу изменения во времени управляемого входа объекта.

Эксперимент на объекте позволяет определить реакцию объекта на это воздействие.

Для статического объекта эта реакция образует ряд

$$Y_1, \dots, Y_N, \quad (3.16)$$

где  $Y_i = F^0(U_i)$ ,  $i = 1, \dots, N$ , - реакция объекта в  $i$ -м эксперименте, а для динамического  $Y(t) = F^0(U(t))$ .

В свою очередь, наблюдения образуют  $N$  пар  $I_i$  для статического объекта:

$$I_i = \langle U_i, Y_i \rangle, \quad i = 1, \dots, N, \quad (3.17)$$

и пара  $I$ :

$$I = \langle U(t), Y(t) \rangle \quad (3.18)$$

для динамического объекта - являются исходной информацией для определения параметров  $C$  модели  $F$ :

$$Y = F(U). \quad (3.19)$$

Как видно, после проведения эксперимента задача определения параметров модели сведена к задаче идентификации (см. предыдущий этап).

Для получения модели вида (3.11) необходимо рассматривать уже тройки наблюдений  $I_i$ :

$$I_i = \langle X_i, U_i, Y_i \rangle, \quad i = 1, \dots, N \quad (3.20)$$

или

$$I = \langle X(t), U(t), Y(t) \rangle, \quad 0 \leq t \leq T. \quad (3.21)$$

То есть в процессе планирования экспериментов с объектом необходимо учитывать и состояние среды  $X$ .

Следует отметить, что в процессе планирования экспериментов с объектом у экспериментатора могут измениться представления о структуре модели (например, первоначальная гипотеза о линейности модели будет заменена гипотезой о нелинейности определенного вида). Это обстоятельство заставляет снова обращаться к структурному синтезу, точнее, вводить коррекцию структуры модели. Сказанное несколько «размывает» понятие планирования эксперимента, распространяя его и на процессы выбора структуры модели, и на ее коррекцию.

Таким образом, на этапе планирования экспериментов определяются параметры модели, которые нельзя определить на этапе идентификации, и корректируется структура модели. Но цель обоих этапов - окончательное создание модели  $F$  объекта управления  $F^0$ . На этом задачу *синтеза модели*, которой посвящены этапы 3, 4 и 5, можно считать решенной.

Полученная модель является исходной для процесса *синтеза управления*.

**6. Синтез управления.** Этот этап связан с принятием решения о том, каково должно быть управление  $U$ , чтобы достигнуть заданной цели  $Z^*$  управления объектом. Это решение опирается на име-

ющуюся модель  $\mathbf{F}$  объекта, заданную цель  $\mathbf{Z}^*$ , полученную информацию о состоянии  $\mathbf{X}$  среды и выделенный ресурс управления  $\mathbf{R}$ , который чаще всего представляет собой ограничения, накладываемые на управление  $\mathbf{U}$  в связи со спецификой объекта и возможностями системы управления (временными, энергетическими, материальными и т. д.).

Естественно синтезированное управление  $\mathbf{U}$  считать оптимальным, когда  $\mathbf{U} = \mathbf{U}^*$ , так как оно должно удовлетворить поставленной цели  $\mathbf{Z}^*$  управления. В общем случае оно представляет собой программу изменения управляемых параметров во времени

$$\mathbf{U}^* = \mathbf{U}^*(t). \quad (3.22)$$

Эту программу предстоит реализовать на следующем этапе.

**7. Реализация управления** связана с реализацией программы оптимального управления (3.22). Этот процесс не вызывает затруднений, если сведения о состояниях среды  $\mathbf{X}$ , объекта  $\mathbf{Y}$  и его модели  $\mathbf{F}$  достоверны. Однако к моменту реализации все могло измениться. Для учета такого рода изменений требуется соответствующая коррекция управления  $\mathbf{U}$  в процессе его реализации. Исходной информацией для такой коррекции является новое состояние среды к моменту реализации управления или прогноз этого состояния. В общем случае не всегда удается в полной мере достичь поставленных целей, но следует действовать так, чтобы отклонение от них было минимальным. Поэтому план оптимального управления  $\mathbf{U}^*(t)$  и его реализация иногда отличаются так же, как благие намерения в жизни от их осуществления. Только реализовав управление и получив новое состояние объекта, можно обнаружить, достигнута поставленная цель или нет.

Скорее всего цель управления не будет достигнута одномоментно (напомним, что мы управляем сложным объектом, который благодаря своей «зашумленности» и нестационарности не позволяет ограничиться однократным актом управления). Поэтому придется возвращаться к одному из предыдущих этапов. Даже в самом лучшем случае, когда поставленная цель оказывается достигнутой, необходимость обращения к предыдущему этапу вызывается изме-

нением состояния среды  $X$  или сменой цели управления  $Z^*$ . Таким образом, при самом благоприятном стечении обстоятельств обращаются к этапу синтеза управления для определения нового управления, которое отражает новую сложившуюся ситуацию и новую цель. Так функционирует стандартный контур управления (см. стрелку 1 на *рис. 3.4*).

**8. Коррекция.** Этот этап обусловлен спецификой сложного объекта управления и заключается в возвращении к одному из предыдущих этапов управления (см. стрелки 2 -5 на *рис. 3.4*). Дело в том, что все решения, принимаемые на предыдущих этапах, приближенные, опираются на старую информацию и отражают состояние объекта лишь в прошедшие моменты времени.

Коррекция может затрагивать различные этапы. Простейшая коррекция связана с подстройкой параметров  $C$  модели (см. стрелку 2 на *рис. 3.4*). Такого рода коррекцию обычно называют адаптацией модели. Иногда может оказаться, что оптимальное управление  $U^*(t)$  не обеспечивает необходимой варибельности (разнообразия) управляемого входа объекта для эффективной последующей коррекции параметров  $C$  модели. Тогда приходится обращаться к планированию экспериментов с объектом в процессе управления им путем добавления специальных тестовых сигналов к управлению (см. штриховую стрелку на *рис. 3.4*). Такое управление называют дуальным, т. е. двойственным, так как его задачей является не только достижение целей управления, но и коррекция параметров модели объекта.

Однако коррекции параметров  $C$  модели может оказаться недостаточно, если изменилась структура объекта. Поэтому время от времени необходима коррекция структуры модели  $St$ , то есть приведение ее в соответствие с изменяющейся структурой объекта (см. стрелку 8 на *рис. 3.4*).

Далее коррекция может коснуться самого объекта, точнее, границы раздела объекта и среды. Это бывает необходимо при значительном изменении (эволюции) объекта и окружающей его среды.

В этом случае коррекция «узаконит» новые взаимоотношения нового объекта со средой (см. стрелку 4 на *рис. 3.4*).

И последнее. Созданная система управления по ряду причин (значительное изменение свойств среды и объекта) может не реализовать все исходное множество целей управления  $\{Z^*\}$ , которые породили эту систему, или реализовать их недостаточно эффективно. Тогда возникает необходимость коррекции целей управления, которая заключается в определении нового множества целей, достигаемых с помощью этой системы управления. В результате этой коррекции потребитель узнает, какие же цели данная система управления действительно может реализовать в объекте (см. стрелку 5 на *рис. 3.4*). Реализация указанных мер и образует адаптивную систему управления, которая приспособливается к изменяющимся свойствам среды, объекта и потребностям. Часто потребителя вполне удовлетворяет созданная система управления, несмотря на то, что она не реализует всех заданных целей. Предоставленная возможность достижения каких-то новых целей (ранее ненужных ему) формирует потребности в осуществлении достижимых целей. Так, часто мы едим не потому, что голодны, а потому, что так сложились обстоятельства и «аппетит приходит во время еды». Особенно ярко этот механизм проявляется в рыночных условиях, когда с помощью мощной рекламы предложение порождает спрос. Заметим, что чем больше номер стрелки на *рис. 3.4*, тем реже срабатывает эта обратная связь. Благодаря функционированию описанной системы коррекции система управления все время приводится в соответствие с изменяющимися средой и объектом управления. В результате система управления как бы эволюционирует вместе с объектом и средой, но так, чтобы все время хорошо выполнялись цели управления. Если же эта эволюция объекта управления заходит настолько далеко, что исходное множество целей перестает выполняться, то коррекция целей обеспечивает эволюцию целей управления.

Не все описанные выше восемь этапов управления реализуются при синтезе системы управления. Некоторых может и не быть.

Например, когда объект управления уже выделен из среды (самолет, космический корабль, станок и т. д.), или нет необходимости в этапе планирования эксперимента, так как модель объекта настолько проста и «прозрачна», что все ее параметры можно определить без специально организованного эксперимента. Может отсутствовать этап формулировки целей управления: настолько они очевидны и естественны. Природа не столь «злонамеренна», и при работе реальных систем управления редко приходится реализовывать все этапы управления, как правило, некоторые этапы просто выпадают в силу специфики целей и объекта управления. Так, при управлении автомашиной не возникает проблемы выбора объекта управления, а при лечении больного цель всегда одна и та же - вылечить и не навредить. Но в любом случае при управлении сложным объектом должен существовать этап коррекции модели объекта управления. Необходимость этого этапа вызвана сложностью объекта управления. Только для простых объектов он может отсутствовать. Однако всегда необходимо быть готовым к самому худшему и знать все восемь этапов, замкнутые в железное кольцо системы управления!

### **§ 3.3. Основы теории автоматического управления (регулирования) объектами и процессами в теплоэнергетике [3-8]**

Любой агрегат, аппарат или устройство, в котором требуется что-либо регулировать, в автоматике называется объектом регулирования (объект управления). Тот параметр, который требуется регулировать, называют регулируемым параметром. То значение параметра, которое необходимо поддерживать постоянным или изменять по какому-либо закону, называют заданным значением. В частности, в теплоэнергетике к параметрам контроля обычно относятся давление различных сред, их расход, уровень жидких и сыпучих сред, температура сред, концентрация каких-либо компонентов в жидкостях или газах и т. п. Для измерения этих параметров

выпускаются различные контрольно-измерительные приборы, которые были рассмотрены в предыдущей главе.

Контрольно-измерительные приборы могут быть установлены по месту (на трубопроводах, у оборудования и т. п.) и на щитах контроля и управления, которые для удобства наблюдения за ходом процесса обычно выносятся на расстояние от работающего оборудования [9; 10].

Основная масса приборов выносится на щиты и называется вторичными измерительными приборами (см. *рис. 3.5*).

Первичными приборами являются датчики для измерения параметров с преобразователями различного типа для передачи показаний на расстояние (к вторичным измерительным приборам и регуляторам).

Датчики обычно имеют в своем составе чувствительный элемент и один или несколько преобразователей.

Чувствительные элементы отличаются в зависимости от измеряемого параметра. Преобразователи переводят сигналы от чувствительного элемента в вид энергии (обычно электрической), удобной для дистанционной передачи показаний.

В настоящее время выпускаются датчики с унифицированными нормированными выходными сигналами. В качестве унифицированных сигналов чаще используются токовые сигналы ( $0-5 \text{ mA}$ ;  $4-20 \text{ mA}$ ) или по напряжению. В таком случае в структурной схеме датчика появляется еще один преобразователь (*рис. 3.5б*), который называют нормирующим (НП — нормирующий преобразователь).

При использовании цифровых измерительных приборов необходимо унифицированные аналоговые сигналы переводить в цифровые.

На схеме (*рис. 3.5в*) появляется еще один элемент - аналого-цифровой (АЦП). Нормирующие АЦП могут быть отдельными устройствами, могут быть встроены во вторичные измерительные приборы, могут быть встроены в датчики [11; 12].

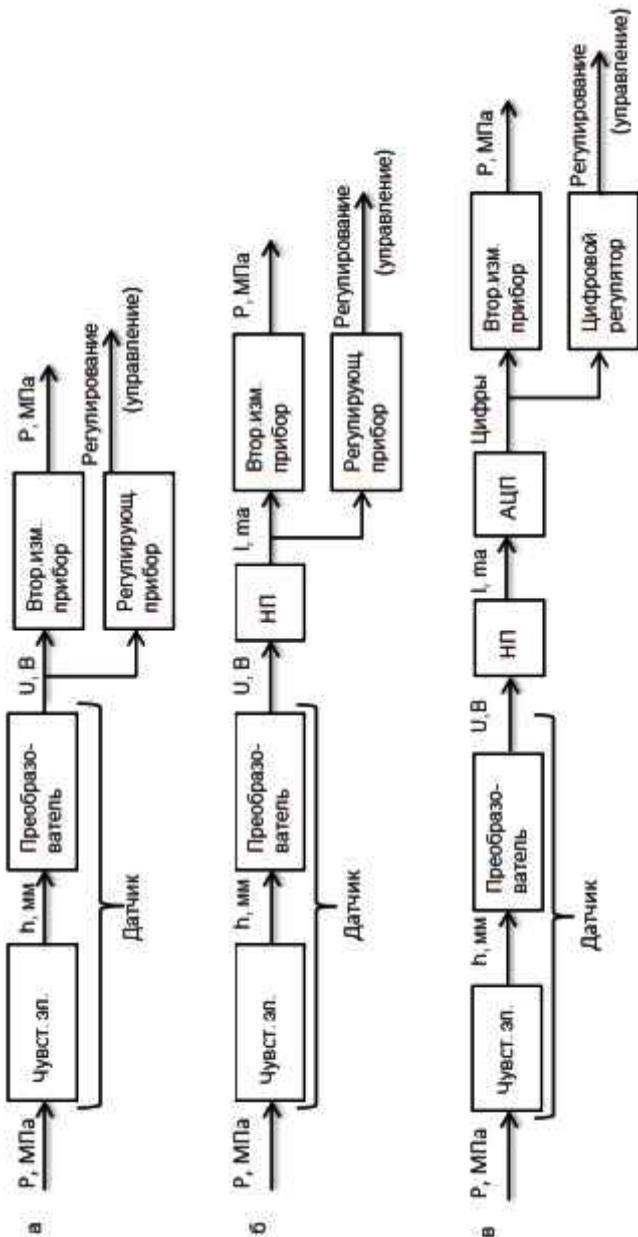


Рис. 3.5. Структурная схема чувствительного элемента (датчика давления):

а – с одним преобразователем; б – с двумя;

в – с цифровым регулированием: Р – давление; h – перемещение;

U – напряжение (электрический сигнал)

### 3.3.1. Первичные приборы для измерения параметров

#### Измерение давления

В качестве чувствительного элемента используются одновитковые и многовитковые трубчатые пружины, мембраны, сильфоны, которые переводят сигнал по давлению в перемещение.

Для преобразования сигналов перемещения  $h$  в электрический вид используются реостатные, индукционные, дифференциально-трансформаторные, ферродинамические, тензометрические преобразователи и т. п. [13].

Пример построения датчика давления с сильфоном в качестве чувствительного элемента показан на *рис. 3.6*.

Аналогично строятся датчики для измерения напоров и разрежений.

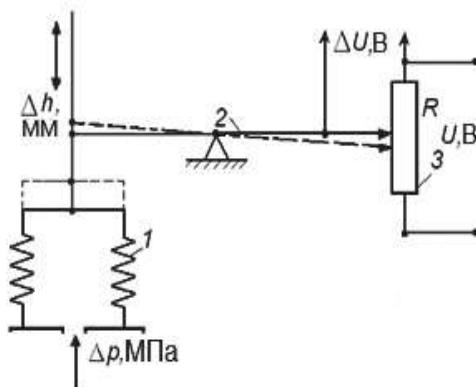


Рис. 3.6. Схема построения датчика давления:

1 – сильфон (чувствительный элемент); 2 – рычаг преобразователя;

3 – реостатный преобразователь (2 и 3 – преобразователь);

$\Delta p$  – диапазон изменения давления;  $\Delta h$  – диапазон перемещений сильфона;

$\Delta U$  – диапазон изменений выходного электрического сигнала

### ***Измерение расходов***

Существуют различные способы измерения расходов жидкостей: по перепаду давления на диафрагме, вихревые расходомеры, ультразвуковые, электродинамические и т. п. [14].

До сих пор наиболее распространенным и надежным способом измерения является измерение расходов газов и жидкостей с помощью диафрагм, установленных в трубопроводы. Расчет массовых расходов удобно производить по формулам

$$Q = K \sqrt{\rho \Delta p_d}, \quad (3.23)$$

$$Q = K' \sqrt{\Delta p_d}, \quad (3.23a)$$

где  $K$ ,  $K'$  – константы;  $\rho$  – плотность среды;  $\Delta p_d$  – перепад давления на диафрагме.

Формула (3.23a) позволяет рассчитывать расходы только по перепаду давления  $\Delta p_d$ , если давление и температура среды равны тем значениям, которые были заданы при расчете диафрагмы. Если давление и температура среды будут отличаться от расчетных значений, то необходимо вводить поправку на изменение плотности среды (формула (3.23)). В настоящее время появилась возможность точного измерения расхода при переменных давлениях и температурах сред по формуле (3.23) при цифровых измерениях. В формулу вводится выражение для расчета плотности (газа, пара, жидкости).

Датчиками для измерения перепада давления служат дифференциальные манометры ДМ, «Сапфир 22-ДД», «Сапфир 22-ДР», «Метран» и др.

### ***Измерение уровня жидкости***

Для измерения уровня жидкостей обычно используется перепад давления, создаваемый разностью столбов жидкостей в импульсных линиях, который измеряется датчиками перепада давления. Один уровень делается постоянным, а другой – переменным (уровень воды в барабане парового котла, в деаэраторах, в баках). Существуют и другие методы измерения уровня жидкости, которые используются на конкретном оборудовании [14].

### **Измерение температур**

Для измерения температур с передачей показаний на расстояние чаще всего используются термопары и термометры сопротивления [15; 16].

Основная идея измерения при помощи термопары состоит в использовании эффекта Зеебека. Если одни концы двух разнородных материалов (проводов) сварить и опустить в горячую среду с температурой  $t_r$ , то на других концах проводов, находящихся при температуре окружающей среды  $t_x$ , появится *термо-ЭДС*  $E$ , пропорциональная разности температур  $t_r$  и  $t_x$

$$E = k (t_r - t_x), \quad (3.24)$$

где  $k$  - коэффициент пропорциональности.

В теплоэнергетике используются чаще всего три типа термопар:

- 1) термопара «хромель–алюмель» (ТХА). Диапазон длительного измерения температур  $0-800^\circ \text{C}$ ;
- 2) термопара «хромель–копель» (ТХК). Диапазон длительного измерения температур  $0-600^\circ \text{C}$ ;
- 3) термопара «платинородий–платина» (ТПП). Диапазон измерения температур  $0-1400^\circ \text{C}$ .

Вторичными приборами служат милливольтметры и автоматические потенциометры.

Для измерения температур используется зависимость изменения электрического сопротивления проводника  $R_t$  от температуры (термометры сопротивления)

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t), \quad (3.25)$$

где  $R_0$  — сопротивление проводника при постоянной температуре (например,  $0^\circ \text{C}$ );  $\alpha$  - коэффициент, учитывающий изменение сопротивления проводника при изменении температуры на  $1^\circ \text{C}$ ;  $t$  - температура среды,  $^\circ \text{C}$ .

В теплоэнергетике нашли применение два типа термометров сопротивления:

1) термометр сопротивления медный (ТСМ), который используется в диапазоне изменения температур  $0-180^{\circ}\text{C}$ ;

2) термометр сопротивления платиновый (ТСП), в диапазоне температур  $0-500^{\circ}\text{C}$ .

Вторичными приборами служат логометры и автоматические мосты.

### ***Измерение концентраций***

Датчиками для измерения концентраций служат специально создаваемые устройства, которые используются только для того физико-химического процесса, который заложен в метод измерения. Какого-либо единого способа измерения концентраций нет.

В котельной технике обычно необходимо измерять концентрацию солей в котловой воде и концентрацию кислорода в дымовых газах [17].

Работа датчика концентрации солей в котловой воде (солесодержание котловой воды) основана на изменении электропроводности воды в зависимости от содержания солей [18; 19].

Для измерения концентрации свободного кислорода в дымовых газах в настоящее время используется электрохимический датчик (ЭХД).

Принцип его работы состоит в том, что при разных концентрациях измеряемой среды на поверхностях стенки датчика, находящегося при температуре примерно  $900^{\circ}\text{C}$ , возникает разность потенциалов, которая пропорциональна разности концентраций (рис. 3.7).

Значение термо-ЭДС  $E$  достаточно большое и может быть использовано для измерения и регулирования.

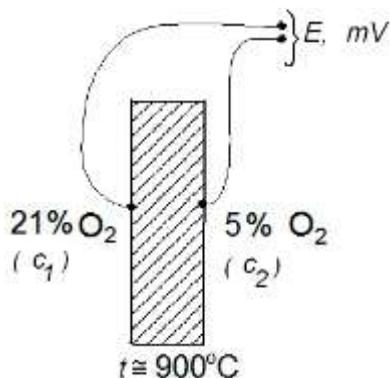


Рис. 3.7. Принцип измерения концентрации кислорода в дымовых газах.

$E = k(c_1 - c_2)$ , где  $k$  – коэффициент пропорциональности

Контрольно-измерительные приборы выпускаются с разными функциями, которые они выполняют:

- 1) показывающие (имеют шкалу и стрелку);
- 2) регистрирующие (дополнительно записывают на диаграмму);
- 3) интегрирующие (имеют счетчик количества протекающей среды);
- 4) сигнализирующие (используются в схемах защиты и сигнализации);
- 5) регулирующие (используются для целей регулирования каких-либо параметров).

*Технологическая сигнализация* служит для оповещения персонала о происшедших изменениях в режимах работы оборудования. Она подразделяется на основные виды:

- 1) контрольная;
- 2) предупредительная;
- 3) аварийная.

*Контрольная сигнализация* оповещает персонал о включениях, отключениях или переключениях в работе того или иного оборудования.

Сигнализация световая (лампы зеленого, красного цвета). По сигнализации судят о том, включено оборудование или отключено. Контрольная сигнализация всегда сопровождает действия дистанционного управления.

*Предупредительная сигнализация* предупреждает персонал о возникших отклонениях в режиме работы оборудования, которые могут привести к аварии. Она срабатывает обычно по отклонению параметров до *1-го* допустимого предела.

Сигнализация может быть *световая* и *звуковая*.

*Световая*: зажигается световое табло предупредительной сигнализации на щите *КИПиА* с высвечиванием параметра, который стал причиной срабатывания сигнализации.

*Звуковая* - электрический звонок. При срабатывании этой сигнализации персоналу дается время для принятия мер по восстановлению нормального технологического режима работы. Примером предупредительной сигнализации служит ее срабатывание по отклонению уровня воды в барабане котла до *1-го* допустимого предела ( $\Delta H_6 = (\pm 70) \text{ мм } H_2O$  от номинального).

*Аварийная сигнализация* оповещает персонал о том, что сработала автоматическая аварийная защита, отключившая основное оборудование. Эта сигнализация также *световая* и *звуковая*.

*Аварийная световая*: зажигается световое *табло аварийной сигнализации* с указанием причины срабатывания защиты.

*Аварийная звуковая*: включается электрический звонок громкого боя, гудок или сирена, т. е. звук, отличный от срабатывания предупредительной сигнализации.

*Автоматические защиты* предназначены для защиты работающего оборудования от возникновения аварий. Они подразделяются на два вида:

- 1) *локальные* (или *местные*) защиты;
- 2) *основные* (или *аварийные*) защиты,

*Локальные защиты* включают, отключают или переключают часть работающего оборудования при отклонении некоторых параметров за допустимые пределы. Основное оборудование продолжает работать.

При восстановлении параметра *локальные защиты* отключаются.

### ***Примеры локальных защит:***

1) установка предохранительных клапанов по давлению пара на барабане котлов и за пароперегревателем. При повышении давления сверх допустимого предохранительные клапаны открываются, давление в котле сбрасывается до нормального, клапаны закрываются. Котел (основное оборудование) продолжает работать;

2) при повышении уровня воды в барабане котла до 2-го допустимого предела ( $\Delta H_6 > 100 \dots 120 \text{ мм } H_2O$ ) *локальная защита открывает* аварийный слив из барабана котла. При восстановлении уровня воды аварийный слив закрывается. Котел продолжает работать;

3) при выходе из строя одного из рабочих питательных насосов (падает давление воды на нагнетании) *локальная защита включает* резервный питательный насос и после выхода его на рабочий режим отключает неисправный (АВР насосов);

4) перевод котла на 50 % нагрузки при выходе из строя одного из двух работающих вентиляторов или дымососов.

*Основные (аварийные) защиты* отключают основное оборудование, предотвращая развитие аварий.

Задачей срабатывания *аварийной защиты* является отключение подачи энергии на основное оборудование (электроэнергии, топлива и т. п.).

Примером срабатывания аварийной защиты является отключение парового котла при выходе некоторых параметров за допустимые пределы (давление газа на горелки, понижение-повышение уровня воды в барабане котла, погасании факела в топке и т. п.). Защита отключает подачу топлива.

Срабатывание *аварийной защиты* всегда сопровождается срабатыванием *аварийной сигнализации*.

Параметры, по которым срабатывает предупредительная сигнализация или защита, определяются для конкретного оборудования согласно технологии его работы.

*Автоматические блокировки* предназначены для защиты оборудования от неправильных действий персонала. Они подразделяются на два вида:

- 1) *запретно-разрешающие блокировки*;
- 2) *аварийные блокировки*.

*Запретно-разрешающие блокировки* предназначены для защиты оборудования при ручных запусках всего оборудования в работу и ручных отключениях. Ручные включения и отключения оборудования должны производиться в правильной технологической последовательности. Нарушение этой последовательности может привести к неприятным последствиям, в том числе к авариям. Если включения производятся правильно, то блокировки разрешают проводить следующий шаг включения (выключения), а если неправильно, то блокировка запрещает (не дает) производить следующий шаг включения (отключения).

*Примером запретно-разрешающих блокировок* может служить включение в работу системы топливоподачи на котлах, работающих на твердом топливе.

Пусть от угольного склада до угольных бункеров котлов существует три ленточных транспортера (1, 2 и 3). Правильный порядок включения:

- 1) Включить третий транспортер, раздающий уголь по бункерам котлов.
- 2) Включить второй (промежуточный) транспортер, подающий уголь после дробилки на третий транспортер.
- 3) Включить первый транспортер, подающий уголь с угольного склада.

При нарушении порядка включения транспортеров, оператор не сможет этого сделать, иначе может быть завал углем системы топливоподачи (авария).

Отключение работающей системы топливоподачи должно производиться в обратном порядке.

*Аварийные блокировки* производят автоматически (без участия персонала) все необходимые действия по полному останову оборудования после срабатывания *аварийной защиты*.

Примером автоматических блокировок может служить остановка барабанного парового котла с пароперегревателем, работающего на общую паровую магистраль.

*Основная (аварийная) защита* отключает подачу топлива и воздуха (вентилятор).

*Аварийные блокировки* закрывают главную паровую задвижку, отключая котел от паровой магистрали; открывают продувку пароперегревателя; закрывают впрыск конденсата на пароохладитель; прикрывают подачу питательной воды; закрывают подачу газа на горелки и т. п.

*Дистанционное управление* подразумевает ручное управление на расстоянии различными механизмами (насосами, вентиляторами, дымососами, электрофицированными задвижками и т. п.). Дистанционное управление используется и как резерв при временном выходе из строя автоматического управления (автоматического регулирования).

Действие *дистанционного управления* всегда сопровождается срабатыванием *контрольной сигнализации*.

Под *автоматическим управлением* понимают ведение сложного технологического процесса без участия персонала, основной задачей которого является выработка и реализация таких решений, которые при данных условиях обеспечивают наиболее эффективное достижение поставленной цели.

Целями управления технологическим процессом могут быть: поддержание значения некоторой физической величины с заданной точностью; изменение величины по определенной наперед заданной

программе; оптимальное значение величины или некоторого обобщающего критерия; максимальная производительность; минимальные затраты энергии на выработку какого-либо продукта и т. п.

В простых случаях, когда требуется поддерживать параметр при каком-либо постоянном значении или изменять его по какому-либо закону, автоматическое управление называют автоматическим регулированием.

### **3.3.2. Структура объектов регулирования и автоматизации в теплоэнергетике [20-23]**

В любом объекте регулирования имеется приток среды или энергии в объект и ее расход из объекта (см. *рис 3.1*).

Расход среды или энергии из объекта поступает потребителю, который может изменять его по своему усмотрению (см. *рис 3.2*).

Те устройства, с помощью которых можно изменять расходы сред, называют регулирующими органами (управляющими органами) - это могут быть регулирующие клапаны, заслонки, направляющие аппараты, питатели и т. п. (см. *рис 3.3*).

Любой объект регулирования может находиться в двух режимах работы: статическом и динамическом.

*В статическом (установившемся) режиме* приток среды или энергии в объект равен ее расходу из объекта. В объекте никаких изменений не происходит, регулируемый параметр не изменяется, он постоянен. Его обычно принимают за заданное значение. В этом случае регулирования не требуется.

*В динамическом (переходном, неустановившемся) режиме* приток среды или энергии в объект не равен ее расходу из объекта. В объекте начинаются изменения, параметры начинают изменяться. В этом режиме требуется регулирование.

Причиной возникновения дисбаланса между притоком среды или энергии в объект и ее расходом из объекта в основном является потребитель (внешнее возмущение) или нестабильность параметров входных потоков (внутренние возмущения).

Рассмотрим эти понятия на примере бака с водой как объекта регулирования уровня воды (рис. 3.8):

- 1) в статическом режиме  $Q_1 = Q_2$ ;  $\Delta Q = Q_1 - Q_2 = 0$ ;  
 $H = \text{const} = H_0$ ;
- 2) в динамическом режиме  $Q_1 \neq Q_2$ ;  $\pm \Delta Q = Q_1 - Q_2$ ;  
 $H$  изменяется.

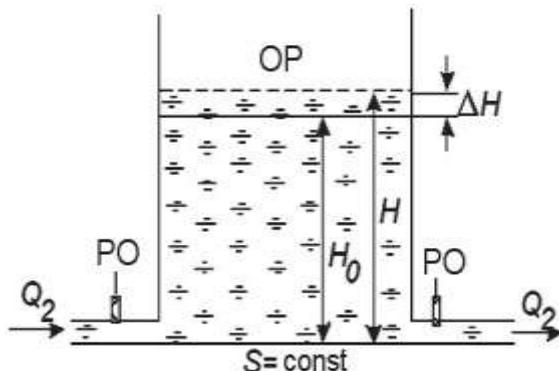


Рис. 3.8. Объект регулирования уровня воды (бак):

- ОР – объект регулирования; РО – регулирующий орган;  
 $Q_1$  – приток среды;  $Q_2$  – расход среды;  $H$  – уровень воды в баке;  
 $H_0$  – заданное значение уровня;  $S$  – сечение бака

При регулировании рассматриваются отклонения уровня от заданного значения  $\pm \Delta H = H_0 - H$ .

При создании системы автоматического регулирования необходимо: измерить уровень  $H$ , сравнить его с заданным значением  $H_0$ ; получить сигнал рассогласования  $\pm \Delta H$ , усилить этот сигнал, послать его на исполнительный механизм, который будет перемещать регулирующий орган. Поскольку потребитель изменяет расход  $Q_2$ , создавая «разбаланс» расходов  $\pm \Delta Q$ , исполнительный механизм должен управлять регулирующим органом на притоке, изменяя расход  $Q_1$  в сторону восстановления баланса.

При выполнении вышеперечисленных задач получают автоматический регулятор, который будет состоять из следующих основных элементов:

- 1) измерительного устройства (датчик) (ИУ);

- 2) элемента сравнения (ЭС);
- 3) управляющего устройства (усилитель) (УУ);
- 4) исполнительного механизма (ИМ).

Структурная схема автоматического регулятора получается путем объединения этих устройств в единую цепочку по последовательному прохождению сигналов (рис. 3.9).

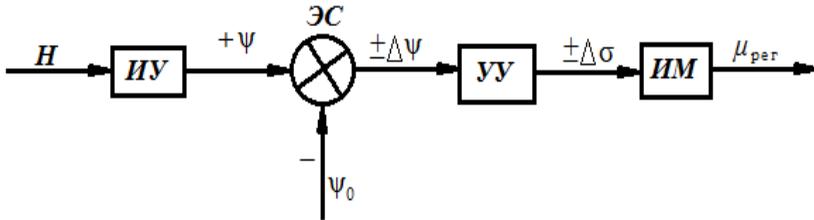


Рис. 3.9. Структурная схема регулятора:

- $H$  – уровень воды в баке;  $\psi$  – электрическое представление уровня;  
 $\psi_0$  – электрическое представление заданного значения уровня ( $H_0$ );  
 $\Delta\psi$  – сигнал рассогласования,  $\pm\Delta\psi = (\psi - \psi_0)$ ;  
 $\sigma$  – управляющий усиленный сигнал;  $\mu_{рег}$  – регулирующее (управляющее) воздействие на регулирующийся орган

Под *системой автоматического регулирования* понимают совокупность объекта регулирования и автоматического регулятора.

Входной величиной объекта регулирования является приток среды, а выходной величиной – регулируемый параметр ( $H$ ). Влияние потребителя на объект регулирования (изменение  $Q_2$ ) обозначим буквой  $I$ , а влияние изменения притока  $Q_1$  обозначим буквой  $\mu_{об}$ . Объект регулирования представляется на структурной схеме в следующем виде (рис. 3.10).

При рассмотрении объектов, в которых протекают другие физические процессы, регулируемым (выходным) параметром может быть температура, давление, расход, концентрация какого-либо вещества, тепловая нагрузка и т. п.

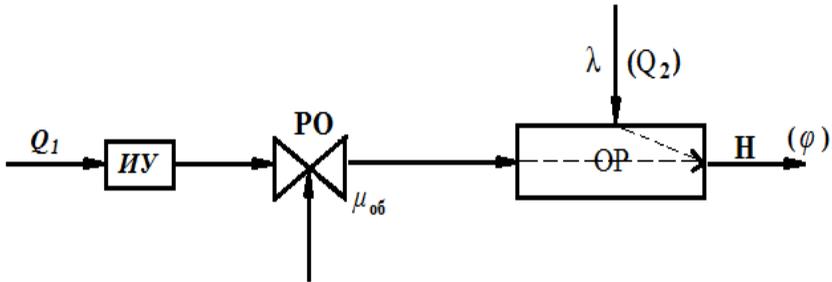


Рис. 3.10. Структурная схема объекта регулирования

Примерами таких объектов могут служить электрическая или газовая печь как объект регулирования температуры; бак с раствором солей как объект регулирования концентрации солей; воздушный раствор как объект регулирования давления воздуха, подаваемого потребителю; паровой котел как объект регулирования тепловой нагрузки и т. д.

В общем случае рассматривают *объект регулирования* какого-либо выходного параметра  $\varphi$ , входное возмущение (изменения расхода  $Q_1$ ) (на рис. 3.10 обозначен буквой  $\mu_{об}$ ).

Объединение структурных схем объекта регулирования и регулятора позволяет получить структурную схему системы автоматического регулирования (САР) (рис. 3.11).

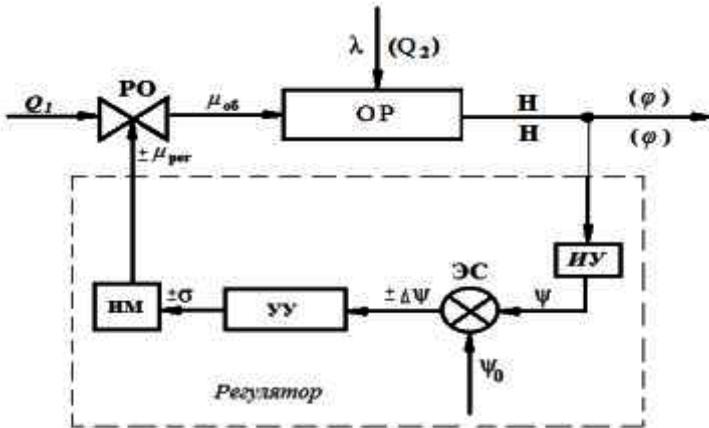


Рис. 3.11. Структурная схема САР

Эта схема фактически является общей для регулирования и других параметров ( $\varphi$ , под которыми кроме уровня можно понимать температуру, расход, давление, концентрацию и др.).

Таким образом, смысл регулирования сводится к восстановлению баланса между  $Q_1$  и  $Q_2$  (т. е.  $\Delta Q = Q_1 - Q_2$ ,  $\Delta Q$  стремится к 0). При этом регулируемый параметр может установиться на заданном значении  $\psi_0$  ( $H_0$ ) или на каком-то новом значении. Это зависит от принятого закона регулирования.

Таким образом, работа системы автоматического регулирования зависит от свойств объекта регулирования и выбранного закона регулирования.

### **3.3.3. Основные свойства теплоэнергетических объектов регулирования**

Все многообразие тепловых объектов регулирования по различным параметрам (паровые и водогрейные котлы, печи, сушильные аппараты, системы теплоснабжения, теплообменники различного типа, компрессорные и кислородные установки и т. п.) можно свести к нескольким типам, если классифицировать их по свойствам и степени сложности.

При классификации по свойствам все объекты можно разделить на следующие виды:

- 1) статические объекты (объекты с самовыравниванием);
- 2) астатические объекты (объекты без самовыравнивания);
- 3) неустойчивые объекты (практически не используются).

Основными типами объектов в теплоэнергетике по свойствам являются статические и астатические.

При классификации по степени сложности объекты теплоэнергетики делятся на:

- 1) простые (или одноемкостные) объекты;
- 2) сложные (многоемкостные, или объекты с распределенной по длине емкостью).

Как простые, так и сложные объекты могут быть статическими или астатическими.

### Одноемкостные объекты

Одноемкостные статические объекты характеризуются тем, что при нанесении возмущения на объект (или со стороны потребителя  $Q_2$ , или со стороны притока  $Q_1$ ) регулируемый параметр (уровень  $H$ ) с течением времени устанавливается на новом значении. Причиной такого поведения параметра является то, что параметр влияет на приток среды в объект и на ее расход.

Это можно проследить опять же на примере бака с водой (см. рис. 3.8). При увеличении  $Q_1$  уровень воды  $H$  увеличится, перепад давления на регулирующем органе на притоке уменьшится, что приводит к уменьшению  $Q_1$ . Увеличение уровня  $H$  приведет к увеличению перепада давления на регулирующем органе со стороны расхода  $Q_2$ , в результате чего увеличится  $Q_2$ . С течением времени  $Q_1$  станет равным  $Q_2$ , и уровень установится на новом значении.

Дифференциальное уравнение одноемкостного статического объекта по каналу «входное возмущение ( $\Delta Q_1 \rightarrow \mu_{об}$ ) - выходной параметр ( $\Delta \varphi \rightarrow \varphi$ )» приводится к стандартному виду, принятому в автоматике,

$$T_{об} \frac{d\varphi}{dt} + \varphi = k_{об}^{\mu} \mu_{об}, \quad (3.25)$$

где  $T_{об}$  - постоянная времени объекта;  $\varphi$  - выходной (регулируемый) параметр;  $k_{об}^{\mu}$  - размерный коэффициент передачи объекта по входному возмущению  $\mu_{об}$ , если  $\mu_{об}$  и  $\varphi$  - размерные величины; если  $\varphi$  и  $\mu_{об}$  приведены к безразмерному виду, то  $k_{об}^{\mu}$  - безразмерный коэффициент передачи;  $\mu_{об}$  - входное возмущение.

Из уравнения (3.25) следует передаточная функция объекта по каналу «входное возмущение  $\mu_{об}$  - выходная величина  $\varphi$ »

$$W_{об}^{\mu}(p) = \frac{\varphi(p)}{\mu_{об}(p)} = \frac{k_{об}^{\mu}}{T_{об}p + 1}. \quad (3.26)$$

Значения  $T_{об}$ ,  $k_{об}^{\mu}$  могут быть рассчитаны для конкретно рассматриваемого объекта. Они определяются из соотношения тепловых и конструктивных величин, входящих в уравнения

динамики объекта при рассмотрении необходимых балансов (энергии, массы, расходов и т. п.).

На практике при работе оборудования возмущение дают путем ступенчатого приоткрытия (или прикрытия) регулирующего органа. Такое возмущение называют однократным ступенчатым. Запись изменения параметра на регистрирующем измерительном приборе дает динамическую характеристику объекта, которую называют кривой разгона (разгонной характеристикой) (рис. 3.12).

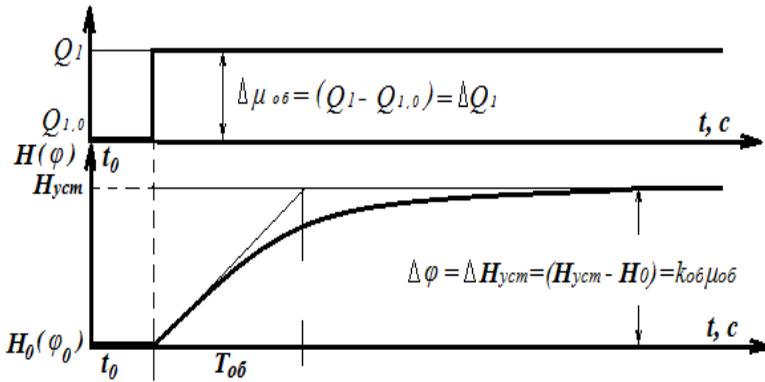


Рис. 3.12. Динамическая характеристика статического объекта:  
 $Q_1$  – новое значение расхода на притоке;  $Q_{1,0}$  – приток среды в начальном статическом режиме работы;  $\Delta\mu_{об}$  – величина возмущения;  
 $t_0$  – момент времени нанесения возмущения;  $H_{уст}$  – новое установившееся значение уровня;  $k_{об}$  – коэффициент усиления (передачи) объекта регулирования;  $T_{об}$  – постоянная времени объекта регулирования, с;  
 $t$  – текущее время, с

Из кривой разгона получают параметры, которые характеризуют объект регулирования – коэффициент усиления  $k_{об}$  и постоянную времени  $T_{об}$ . Эти параметры необходимы для дальнейшего расчета работы системы регулирования.

Одноемкостные астатические объекты характеризуются тем, что небаланс между притоком и расходом среды в объекте имеет постоянное значение ( $\Delta Q = Q_1 - Q_2 = const$ ), следовательно, параметр  $H$  не влияет ни на приток  $Q_1$ , ни на расход среды  $Q_2$  (рис. 3.13).

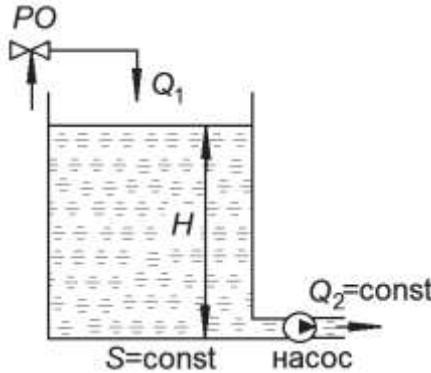


Рис. 3.13. Одноемкостный астатический объект

Кривая разгона при открытии регулирующего органа на притоке имеет вид прямой - линейная функция времени (рис. 3.14) при сечении бака  $S = const$ .

Единственным параметром, характеризующим поведение объекта, является коэффициент пропорциональности  $k'$ , имеющий размерность метры в секунду, если уровень  $H$  измерять в метрах.

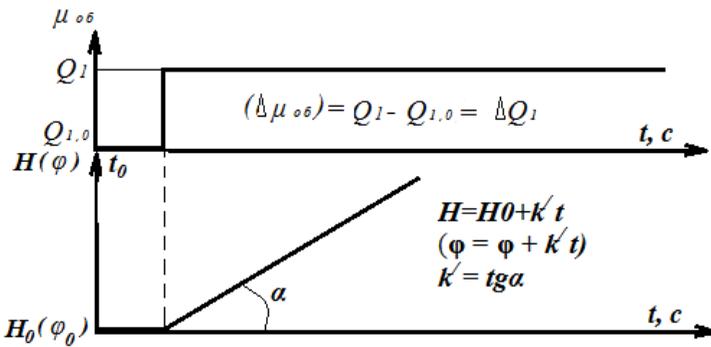


Рис. 3.14. Динамическая характеристика одноемкостного астатического объекта

Дифференциальное уравнение одноемкостного астатического объекта по каналу «входное возмущение  $\mu_{об}$  – выходной параметр  $\varphi$ » будет

$$\frac{d\varphi}{dt} = k' \mu_{об} \quad (3.27)$$

или

$$T_{об} \frac{d\varphi}{dt} = \mu_{об}, \quad (3.27a)$$

где  $k'$  – коэффициент передачи, имеющий размерность скорости изменения параметра  $\varphi$ , деленного на размерность входного возмущения  $\mu_{об}$ .

При записи уравнения (3.27) в безразмерном виде коэффициент  $k'$  будет иметь размерность [1/с], и уравнение может быть записано в другом виде (уравнение (3.27a), в котором  $T_{об} \frac{1}{k'}$  – постоянная времени астатического объекта, которая также используется в расчетах систем регулирования.

### **Многоемкостные (сложные) объекты**

В многоемкостных объектах при нанесении возмущения регулируемый параметр изменяется не сразу, как в одноемкостных, а по истечении некоторого времени с нарастающей скоростью и также с течением времени устанавливается на новом значении (статические объекты) или начинает изменяться с постоянной скоростью (астатические объекты). Примеры многоемкостных статического и астатического объектов по изменению уровня воды во втором баке показаны на *рис. 3.15 а и б*.

Кривые разгона для этих объектов (*рис. 3.16*), как правило, снимаются экспериментально. По ним составляют простейшие модели многоемкостных объектов путем замены реального объекта на последовательное соединение звена с запаздыванием  $t_{об}$  и одноемкостного статического или астатического объекта. Это позволяет

получить передаточные функции моделей, которые широко используются при автоматизации теплоэнергетических объектов.

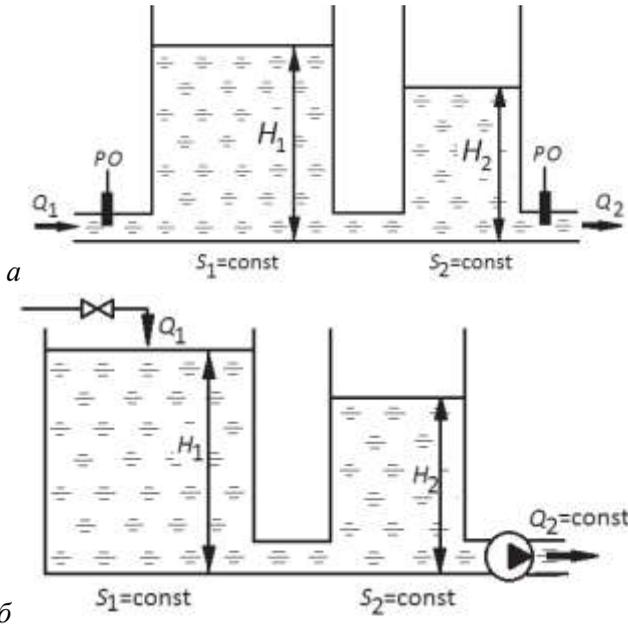


Рис. 3.15. Примеры многоемкостных объектов регулирования:  
а – статический объект; б – астатический объект

Для многоемкостных статических объектов получим

$$W_{об}^{\mu}(p) = \frac{\varphi(p)}{\mu_{об}(p)} = \frac{k_{об}^{\mu}(p) \cdot e^{-p\tau_{об}}}{T_{об}p + 1}, \quad (3.28)$$

где значения  $k_{об}^{\mu}(p)$ ,  $T_{об}$  и  $\tau_{об}$  получают по кривой разгона (см. рис. 3.16а).

Для многоемкостного астатического объекта получим

$$W_{об}^{\mu}(p) = \frac{\varphi(p)}{\mu_{об}(p)} = \frac{k_{об}' \cdot e^{-p\tau_{об}}}{p} = \frac{e^{-p\tau_{об}}}{T_{об}p}, \quad (3.29)$$

где  $k'$  и  $\tau_{об}$  получают из кривой разгона (рис. 3.16б).

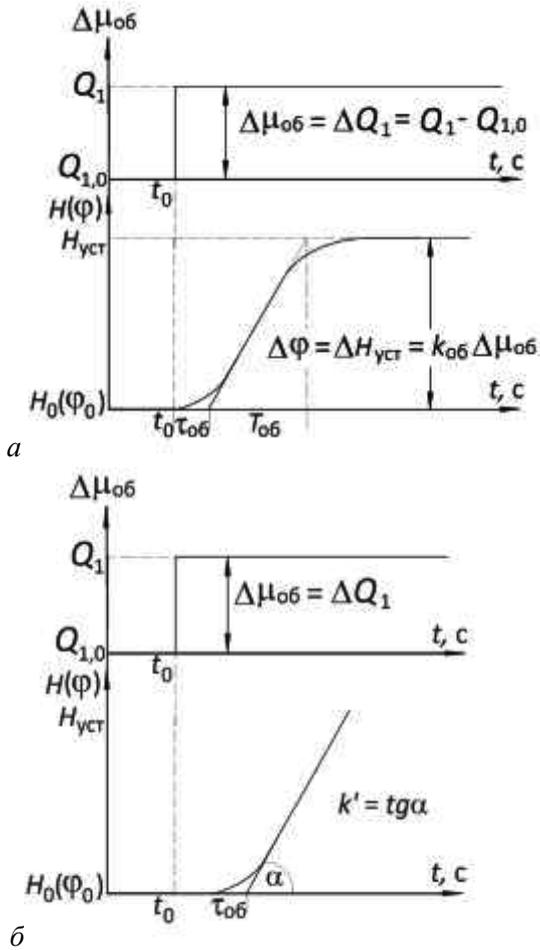


Рис. 3.16. Динамические характеристики многоемкостных объектов:  
 а – статический объект; б – астатический объект

Сложные статические объекты характеризуются параметрами  $k_{об}$ ,  $T_{об}$  и  $\tau_{об}$ , где  $\tau_{об}$  - время запаздывания объекта, а сложные астатические объекты характеризуются параметрами  $T_{об}$  (определяется по  $k'$ ) и  $\tau_{об}$ .

### § 3.4. Основные законы регулирования [24-27]

Под законом регулирования понимают зависимость регулирующего воздействия  $\mu_{рег}$  от изменения регулируемого параметра  $\varphi$  (в общем случае).

Различают следующие основные идеализированные законы регулирования: интегральный (*И-закон*), позиционное регулирование (*Пз-закон*) как частный случай *И-закона*, пропорциональный (*П-закон*), пропорционально-интегральный (*ПИ-закон*), пропорционально-дифференциальный (*ПД-закон*) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (*ПИД-закон*). Пропорционально-дифференциальный закон регулирования используется достаточно редко, поэтому рассмотрим кратко остальные законы.

#### 3.4.1. Интегральный закон

Выходная величина регулятора  $\mu_{рег}$  (это фактически перемещение регулирующего органа) связана с регулируемым параметром  $\varphi$  уравнением

$$\mu_{рег} = \frac{k_p}{T_u} \int \varphi dt, \quad (3.30)$$

где  $k_p$  – коэффициент усиления регулятора (параметр настройки *И-регулятора*);  $T_u$  – время интегрирования. При  $T_u \rightarrow 0$  регулирующий орган будет перемещаться с большой скоростью и быстро достигать крайних значений (открыто полностью или закрыто).

В таком случае основное время регулирующей орган будет находиться в крайних положениях, и *И-закон* переходит в *Пз-закон* (имеем позиционное регулирование).

Примером позиционного регулирования может служить регулирование температуры в электрической печи с подачей напряжения питания с помощью реле (подано-отключено).

### 3.4.2. Пропорциональный закон

Данный закон действует, когда в регулятор введена жесткая (постоянно действующая) отрицательная обратная связь по положению регулирующего органа ( $\mu_{рег}$ ). Выходная величина регулятора  $\mu_{рег}$  связана с регулируемым параметром  $\varphi$  уравнением

$$\mu_{рег} = k_p \varphi, \quad (3.31)$$

где  $k_p$  – коэффициент усиления регулятора (параметр настройки). Этот закон достаточно широко используется, хотя и имеет недостаток - появляется небольшая ошибка регулирования в статических режимах работы (порядка 4-8 %).

### 3.4.3. Пропорционально-интегральный закон

Этот закон действует, когда в регулятор введена гибкая (действующая только при работе регулятора и снимающаяся при его отключении) обратная связь по положению регулирующего органа ( $\mu_{рег}$ ).

Выходная величина регулятора  $\mu_{рег}$  связана с регулируемым параметром  $\varphi$  уравнением

$$\mu_{рег} = k_p \varphi + \frac{k_p}{T_{II}} \int \varphi dt, \quad (3.32)$$

где  $k_p$ ,  $T_{II}$  – параметры настройки ПИ-регулятора.

Этот закон находит наиболее широкое применение при автоматизации объектов регулирования.

### 3.4.4. Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон

ПИД-закон получается, когда в ПИ-регулятор вводится дополнительный импульс по скорости изменения регулируемого параметра. Выходная величина регулятора  $\mu_{рег}$  связана с регулируемым параметром  $\varphi$  уравнением

$$\mu_{рег} = k_p \varphi + \frac{k_p}{T_{II}} \int \varphi dt + k_p T_D \frac{d\varphi}{dt}, \quad (3.33)$$

где  $k_p$ ,  $T_n$ ,  $T_d$  – параметры настройки ПИД-регулятора,  $T_d$  – время дифференцирования.

Это наиболее общий закон регулирования. Из него можно получить предыдущие законы.

При нанесении возмущения  $\lambda$  на объект регулирования параметр начинает изменяться, регулятор включается и работает до тех пор, пока регулируемый параметр не вернется к заданному значению или не установится на новом значении. Изменение регулируемого параметра  $\varphi$  во времени при работе регулятора называют процессом регулирования. Графики процессов регулирования при различных законах показаны на *рис. 3.16*.

После нанесения на объект внешнего возмущения  $\lambda$  (в момент времени  $t_0$ ) параметр  $\varphi$  начинает изменяться, и как только он выйдет за пределы зоны нечувствительности  $\Delta_{неч}$ , регулятор включится в сторону восстановления параметра и будет работать до тех пор, пока регулируемый параметр  $\varphi$  не установится в пределах зоны нечувствительности. Время от момента первого включения регулятора в работу до его окончательного отключения называют временем регулирования  $t_p$  (*рис. 3.17*).

Из графиков процессов регулирования следует, что *И-, ПИ- и ПИД-законы* дают точное регулирование в статических режимах (без статической ошибки), поэтому *ПИ- и ПИД-законы* являются основными законами регулирования, *И-закон* применяется редко из-за большого динамического отклонения параметра и времени регулирования.

При автоматизации теплоэнергетических установок законы регулирования выбираются, исходя из условий точности регулирования.

Обычно, если по технологии работы оборудования допустимы колебания параметра в заданных пределах, выбирают *Пз-закон*; если допустимы небольшие отклонения параметров от заданного значения в установившихся режимах, выбирают *П-закон*; если требуется регулирование без ошибки в статических режимах, выбирают *ПИ-* или *ПИД-законы* регулирования.

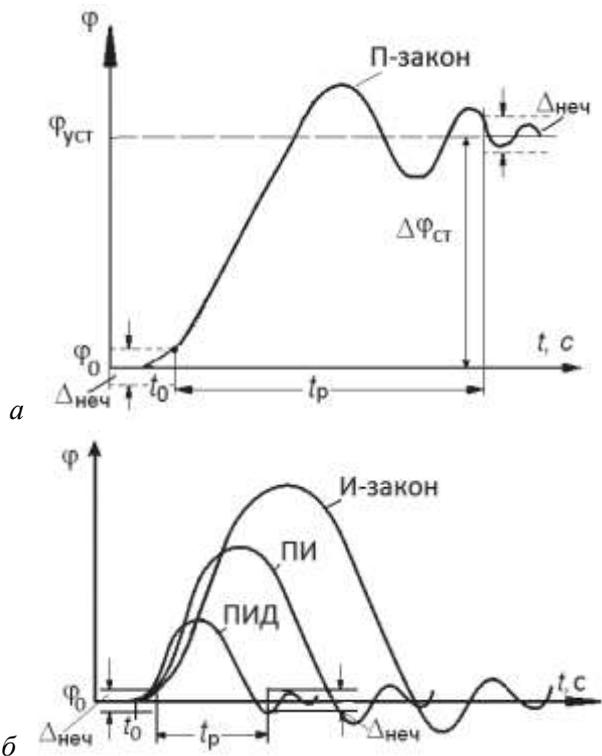


Рис. 3.17. Графики процессов регулирования:  
 а – П-закона; б – И-, ПИ-, ПИД-законов регулирования  
 ( $\Phi_0$  – заданное значение параметра;  $\Phi_{уст}$  – новое установившееся значение параметра;  $\Delta\Phi_{ст}$  – статическая ошибка регулирования;  $\Delta\Phi_{неч}$  – зона нечувствительности регулятора)

### § 3.5. Структурная схема реализации аналоговой системы автоматического регулирования

При технической реализации системы автоматического регулирования (САР) кроме основных элементов регулятора, показанных на рис. 3.18, необходимо иметь дополнительные устройства, позволяющие реализовать систему на практике.

*Измерительные устройства (ИУ)* выпускаются промышленностью в виде датчиков для измерения параметров; *исполнительные механизмы (ИМ)* также выпускаются промышленностью. *Элемент сравнения (ЭС)* и *усилитель (УУ)* совместно с обратными связями включены в аналоговые регулирующие приборы и выпускаются промышленностью.

На рис. 3.18  $\xi$  — сигнал отрицательной обратной связи; *обр.св.* — устройство обратной связи.

В аналоговых регулирующих приборах элементом сравнения служит *измерительный блок (ИБ)*, а усилителем — *электронный блок (ЭБ)*.

Обратные связи встроены в регулирующий прибор.

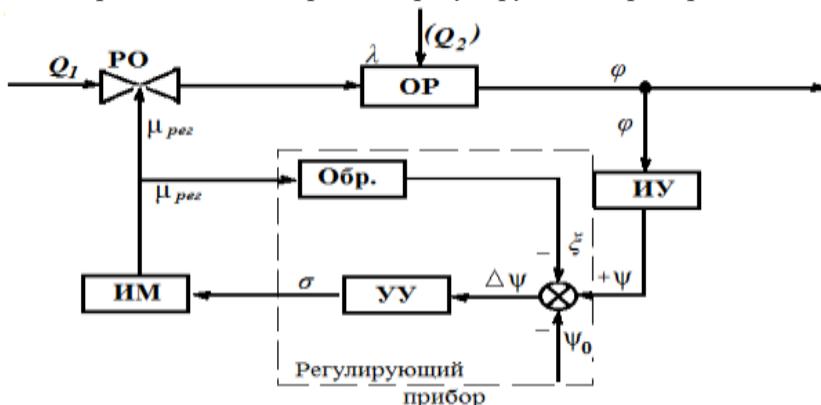


Рис. 3.18. Структурная схема САР

Дополнительные устройства:

1) *датчик (ЗД)* — для подачи в элемент сравнения электрического представления заданного значения параметра  $\psi_0$ ;

2) после регулирующего прибора необходимо иметь возможность переключения цепей автоматики на цепи дистанционного управления регулирующим органом. Для этих целей служит *переключатель управления (ПУ)*. В том случае, когда регулирующий прибор или датчик выйдут из строя, переходят на ручное дистанционное управление работой объекта регулирования;

3) для возможности ручного управления работой объекта служит *ключ управления (КУ)*, с помощью которого можно открывать или закрывать *регулирующий орган (РО)*;

4) *исполнительный механизм (ИМ)* должен автоматически или при ручном управлении закрывать или открывать регулирующий орган. Это означает, что электродвигатель исполнительного механизма должен включаться и вращаться то в одну, то в другую сторону, что осуществляется переброской фаз питания электродвигателя. Для переброски фаз питания электродвигателя служит *магнитный пускатель (МП)*;

5) при ручном дистанционном управлении работой исполнительного механизма необходимо знать, в какую сторону оператор включает исполнительный механизм и на какую величину открывается или закрывается регулирующий орган. Для этих целей служит *указатель положения (УП)* регулирующего органа, который имеет шкалу 0–100 % и работает от *датчика перемещения (ДП)*, имеющегося в любом *исполнительном механизме*.

Все дополнительные устройства также в том или ином виде выпускаются промышленностью.

Из теории автоматического регулирования, рассмотрения структурной схемы *САР* и ее технической реализации следует, что *исполнительные механизмы* управляют перемещением регулирующих органов в сторону восстановления материального или энергетического балансов на притоке среды или энергии в объектах регулирования (управления) в переходных режимах их работы. Поскольку потоки материальных или энергетических сред в теплоэнергетических установках могут быть самыми разнообразными (вода, пар, газ, воздух и т. п.), постольку регулирующие органы

могут иметь разное конструктивное оформление при решении конкретных задач регулирования [28].

*Регулирующим органом* называется устройство, позволяющее изменять расход или направление потока энергии или вещества в соответствии с требованиями технологического процесса.

*Регулирующие органы* теплоэнергетических установок можно разделить на три группы:

- 1) *регулирующие органы дроссельного типа*;
- 2) *регулирующие органы объемного типа*;
- 3) *регулирующие органы скоростного типа*.

Автоматизированные средства и системы регулирования теплоэнергетики достаточно детально рассмотрены в работе [1] и могут быть самыми разнообразными:

- регулирующие дроссельные клапаны и поворотные заслонки;
- системы регулирования и управления производительностью тягодутьевых машин;
- управление сочленениями органов регулирования с исполнительными механизмами регуляторов;
- регулирование органами топливоподающих устройств газообразного и жидкого топлива, поступающего в топку различных агрегатов, осуществляемое с помощью клапанов и поворотных дроссельных заслонок;
- системы регулирования барабанного парового котла:
  - тепловой нагрузки котла (расхода топлива);
  - экономичности процесса горения (подачи общего воздуха);
  - разрежения в топке котла;
  - уровня воды в барабане котла (регулирование питания котла водой);
  - водного режима в барабанных паровых котлах (регулирование солесодержания котловой воды);
  - температуры перегретого пара.

При автоматизации теплоэнергетических установок в целях длительной безаварийной работы, при технологических ограничениях отклонений параметров основными проблемами являются выбор и создание необходимых средств и систем регулирования, обеспечивающих качественную и устойчивую работу установок в условиях различных нагрузок.

Создание систем регулирования для поддержания основных параметров на необходимом уровне производится по вышеприведенной принципиальной структурной схеме.

В случае реализации сложных (многоимпульсных) систем регулирования имеется возможность подключения к приборам дополнительных датчиков ( $D_2$  и  $D_3$ ), которые на *рис. 3.19* показаны пунктирными линиями: по расходам пара ( $D_m$ ) и питательной воды ( $W_B$ ).

Совместно с датчиком по уровню воды ( $H$ ) в барабане парового котла они позволяют осуществить регулирование уровня воды на котлах средней и большой мощности.

По такой схеме осуществляется регулирование в аналоговых (непрерывных) системах регулирования, но вся идеология управления сохраняется и при переводе системы на цифровое управление. Для этого в программу управления вводится возможность изменения заданного значения параметра, переключения на дистанционное управление регулирующим органом и наблюдения за его перемещением. Регулирующие органы совместно с измерительным устройством, регулирующим блоком и исполнительным механизмом через технологический процесс создают замкнутую систему регулирования, т. е. систему, посредством которой производится поддержание на заданном уровне одной или нескольких величин, характеризующих оптимальный режим этого процесса. Следовательно, каждое функциональное звено регулятора, равно как и сам процесс, не только участвуют в работе системы регулирования, но и оказывают влияние на качество регулирования в зависимости от статических и динамических свойств каждого звена и процесса [1].

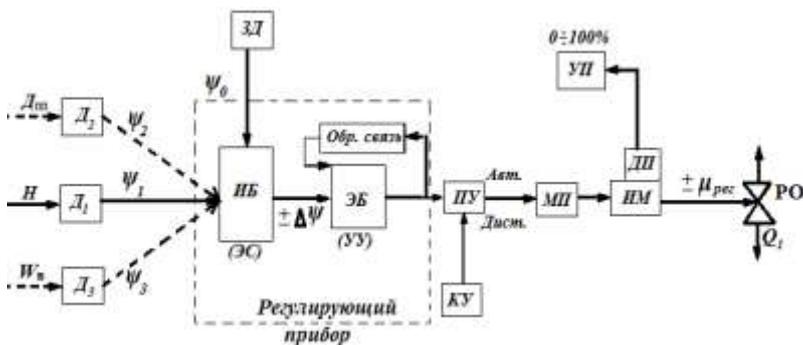


Рис. 3.19. Принципиальная структурная схема регулятора при его технической реализации:

Д1 – датчик уровня (давления, температуры и т. п.)

### § 3.6. Особенности реализации цифровых схем с программным обеспечением автоматического регулирования

*Автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП)* могут быть самыми разнообразными: простейшие, выполняющие несложные цели управления, оснащенные микропроцессорной техникой с ограниченными функциями (контроллеры); сложные, выполняющие разнообразные задачи управления с использованием универсальных микро- или мини-ЭВМ и т. п.

Выполняемые ими задачи и их последовательность заложены в программно-технических комплексах (ПТК) [29; 30].

#### 3.6.1. Управление работой котла с помощью программно-технического комплекса (АСУ ТП)

Рассмотрим в качестве примера АСУ горелочными устройствами котельного агрегата.

Объектом управления являются горелочные устройства котельного агрегата.

Четыре горелки расположены на фронтальной стене в два яруса. К каждой горелке подведены газ и воздух с помощью трубопроводов, снабженных задвижками с электроприводами.

Горелки оснащены *запально-защитными устройствами (ЗЗУ)* факелов запальника и основного факела. Розжиг горелок и их выключение проводятся с заданной очередностью.

Операции по управлению арматурой и ЗЗУ выполняются в последовательности, определенной технологическим регламентом. Система выполняет в автоматизированном режиме совокупность *информационно-вычислительных и управляющих функций*.

***Информационно-вычислительные функции:***

- информация о ходе технологического процесса и состоянии оборудования (режимы управления, положение арматуры и др.);
- сигнализация о нарушениях технологического процесса.

Информация о работе оборудования выводится на средства отображения автоматически или по запросу машиниста котла. Применяется следующий принцип представления информации: сначала выдается групповой сигнал о появлении нарушения, а затем (после вызова видеокadra с нарушением) указывается место и характер нарушения на вызванном видеокadre.

***Управляющие функции АСУ ТП:***

- программное логическое управление технологическими операциями по розжигу и управлению горелок;
- автоматическая защита и блокировка;
- дистанционное управление исполнительными механизмами (ИМ) с автоматизированного рабочего места (АРМ) на блочном щите управления (БЩУ) с помощью функциональной клавиатуры (ФК);
- управление ИМ с местных щитов управления (МЩУ), индивидуальных для каждой горелки.

Структурная схема *автоматической системы управления АСУ ТП*, приведенная на *рис. 3.20*, содержит:

1) *АРМ* машиниста на *БЩУ*, выполненной на базе *ПЭВМ*, снабженной *ФК*;

2) программируемый логический контроллер (микропроцессорный регулятор), в схеме указан контроллер *ТСМ-51*;

3) релейные блоки *КУС*, служащие для преобразования сигналов с напряжением *220 В*, формируемых конечными выключателями *ИМ* в сигналы с напряжением *24 В*, поступающие на входы в контроллеры, а также для преобразования выходных сигналов контроллеров с напряжением *24 В* в сигналы с напряжением *220 В*, подаваемые на входы магнитных пускателей электродвигателей задвижек;

4) *МЩУ*, предназначенные для управления *ИМ* горелок по месту.

#### ***ИМ – исполнительный механизм***

Лицевая панель *ФК* представлена на *рис. 3.20*. С этой клавиатуры можно осуществлять дистанционное *ДУ* и местное *МУ* управление.

Контроллер *ТСМ-51* имеет сравнительно небольшую информационную мощность, поэтому и используется в данной схеме для управления работой только двух горелок. Если котельный агрегат снабжен четырьмя горелками, то для их управления необходимо иметь два контроллера и т. д.

Контроллеры объединены между собой и *ПЭВМ* линией связи. Сигналы в систему поступают от аналоговых датчиков типа *ДА* (указатели положения шиберов на воздушных линиях горелок) и дискретных датчиков типа *ДД* (конечные выключатели, датчики наличия факела).

На *БЩУ* установлены *ПЭВМ* с дисплеем и управляющая *ФК*, сигналы от клавиш которой воспринимаются и обрабатываются специальным программным пакетом, используемым для организации *АРМ* машиниста.

При включении системы на экран дисплея автоматически вызывается обзорная мнемосхема, где условно изображены горелки нижнего и верхнего ярусов с указанием их номеров; отмечено, на каких горелках имеется факел, показаны расходы газа (мазута) и воздуха на отдельную горелку или группу горелок.

***ДД – дискретный датчик; МЩУ – местные щиты управления***

При нажатии на одну из кнопок на экран выводится мнемосхема устройства с изображением соответствующего устройства и относящихся к нему исполнительных механизмов.

С помощью кнопок на панели *ФК* из группы «Режимы управления» для любой горелки вызванной горелки могут быть заданы автоматический розжиг, автоматическое выключение, *дистанционное (ДУ)* или *местное управление (МУ)*.

Заданный режим управления указывается в левом верхнем углу экрана. Переключение *исполнительных механизмов (ИМ)* может проводиться только с *МЩУ*.

Для управления *ИМ* в режиме *ДУ* необходимо его вызвать нажатием соответствующей кнопки, расположенной на мнемосхеме горелочного устройства на функциональной клавиатуре (*ФК*).

Посредством кнопок «Обзор» можно вызвать стартовые обзорные мнемосхемы, содержащие обобщенную информацию по всем четырем горелкам (*более детальная информация в работе [1]*).

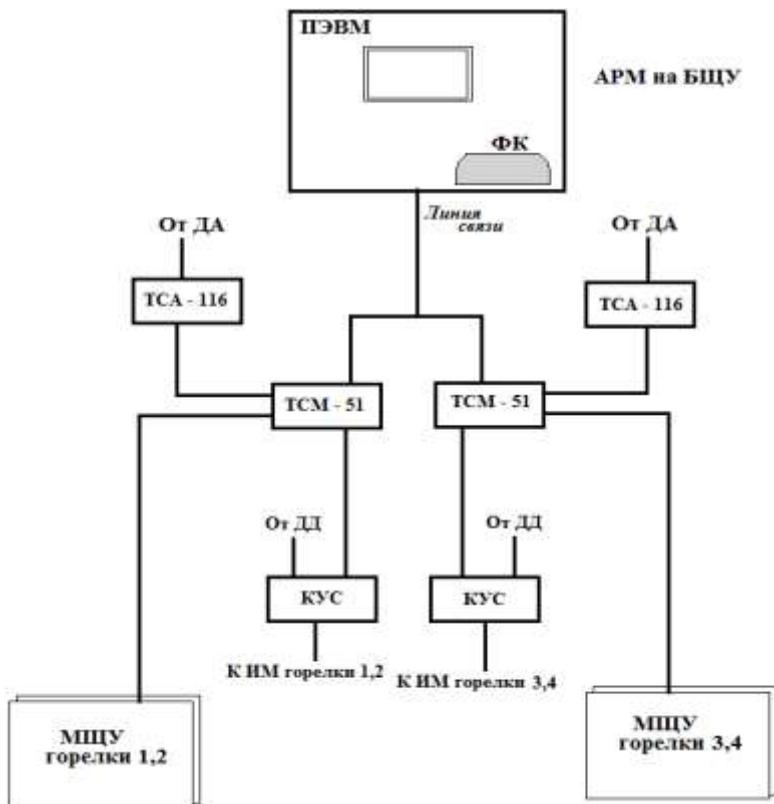


Рис. 3.20. Структурная схема автоматической системы управления АСУ ТП:

- ПЭВМ – персональная электронно-вычислительная машина;
- ТСМ – программируемый логический контроллер;
- ТСА – блок ввода аналоговых сигналов от аналоговых датчиков ДА;
- КУС – релейный блок (преобразователь сигналов);
- АРМ – автоматизированное рабочее место;
- БЩУ – блочный щит управления; ФК – функциональная клавиатура

## ГЛАВА 4. ОСОБЕННОСТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННЫХ СРЕДСТВ И СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ И ПРОЦЕССАМИ

Как это показано в 3 главе данного учебного пособия, любой сложный объект или процесс можно описать формально, а это значит, что управление данным процессом или объектом можно реализовать на основе информационных технологий, используя математический аппарат и ЭВМ. При этом использование математического аппарата позволяет нам найти наиболее эффективное решение любой поставленной задачи, а правильная формализация задачи позволяет использовать ЭВМ. Вместе с тем в процессе формализации задачи и ее решения формальными методами очень важно сохранить в неприкосновенности и здравый смысл, который так ценится в неформальных подходах. Дело в том, что такая задача по силам только специалисту, понимающему возможности формального подхода, но в то же время трезво оценивающему его сильные и слабые стороны.

Эта область знаний (теория и практика управления) бурно развивается со времени выхода книги Норберта Винера о кибернетике, а само понятие «управление» претерпевает неизбежные изменения, отражающие его новые аспекты как в теоретическом, так и прикладном плане. Более того, едва ли нужно «управление» вообще: нужно в определенном смысле наилучшее, оптимальное управление. Ради достижения этой оптимальности создана и развивается наука «УПРАВЛЕНИЕ».

Поскольку формализма «на любой случай» не существует, то здесь и в дальнейшем нас будет интересовать формализм, необходимый для управления «сложными» объектами и процессами. Термин «управление» применяется здесь в самом широком смысле: как *совокупность действий, направленных на достижение поставленных целей*. Под такое определение, как легко видеть, подпадают в принципе все разумные действия.

Необходимость и возможность оценки состояния исследуемого объекта или объекта управления на основании как можно более полной и объективной информации привела к расширению использования результатов не только отдельных измерений, но и больших потоков измерительной информации, получаемых при многоканальных измерениях ряда величин быстро изменяющихся во времени величин (так называемые динамические измерения), требует технической реализации измерительных устройств наиболее оптимальным способом. Сложность и стоимость измерительной аппаратуры при этом «заикаливает», и информационные оценки в этих случаях могут оказаться весьма полезными.

Применение ПК в управленческой сфере качественно меняет технологию повседневной работы специалистов в этой области. Это направление их внедрения стало уже традиционным. Таким образом, традиционное представление сводит проблему применения компьютеров в управлении лишь к вопросам компьютерной грамотности и использования информационных технологий в управлении с точки зрения обработки информации [1; 2].

Появление и быстрый рост численности ПК объясняются прежде всего успехами микроэлектронной техники: широкое внедрение микропроцессоров, реализация элементов памяти в виде интегральных схем и т. д. На резкое улучшение всех эксплуатационных характеристик повлияли также достижения точной механики, успехи в применении новых физических принципов техники.

Еще совсем недавно более или менее глубокое знание хотя бы одного языка программирования являлось не переменным условием полезной, продуктивной работы ЭВМ. На наших глазах это условие теряет силу. Место «за пультом» ПК все более уверенно занимает профессионал-непрограммист – человек, знающий секреты своей профессии, но, скорее всего, не владеющий ни одним из традиционных языков программирования.

Рост важности и объемов работы с информацией, с одной стороны, и появление мощных и доступных информационных машин – с другой, и привели к тому, что все чаще приходится

наблюдать специалиста в своей (непрограммистской) области, работающего с ПК. Это может быть и ученый, и инженер-проектировщик, и административно-управленческий работник, и медик, и экономист, и журналист, и архитектор, и бухгалтер, и патентовед и так далее.

#### **§ 4.1. Возможности использования персонального компьютера**

Одним из основных вариантов использования ПК можно считать организацию на их основе автоматизированных рабочих мест (АРМ). Работают на этих АРМ специалисты, охарактеризованные выше как профессионалы-непрограммисты. АРМ на основе ПК целесообразны, в частности, для создания систем автоматизированного проектирования (САПР) в таких областях, как электроника и радиотехника, электротехника и машиностроение, связь, строительство и т. п. Разработка систем манипулирования данными (информационные банки, базы данных) целесообразна в статистических учреждениях, сельском хозяйстве, торговле, здравоохранении, социально-бытовом обслуживании, образовании. Весьма интересно применение АРМ в научно-исследовательской деятельности, что естественным образом предполагает объединение в интегрированную диалоговую систему проблемно-ориентированных пакетов программ, имеющих отношение к данной области исследований. В зависимости от местных условий применения ПК могут использоваться либо автономно, либо включенными в локальную информационную сеть, либо в качестве интеллектуальных терминалов больших или средних ЭВМ [3; 4].

Наиболее простым является, конечно, режим автономного использования ПК. Пользователь ни от кого не зависит и решает свои задачи без непосредственного привлечения внешних ресурсов. Обмен информацией с другими вычислительными установками осуществляется с помощью дискет или через асинхронные каналы связи.

Режим автономного использования ПК позволяет избавиться от накладных расходов, связанных с коллективным использованием большой или средней ЭВМ.

Режим работы в локальной информационной сети пригоден для облегчения обмена информацией между сотрудниками, объединенными решением общих задач, например, в системе автоматизации административно-управленческой деятельности. Этот режим целесообразен также для разделения определенных дорогостоящих или уникальных ресурсов (таких, как суперЭВМ общего пользования, базы данных на больших накопителях информации, специализированные быстродействующие процессоры, устройства высококачественной печати или графопостроители с высокой разрешающей способностью), между несколькими пользователями, например, в рамках объединяющей их САПР.

Применение ПК в качестве интеллектуальных терминалов более крупных ЭВМ или ПК, подключенных к центрам коллективного пользования, придает их работе посреднический характер. Большая часть «интерфейсных» функций, поддерживающих диалог, взаимодействие с пользователем, а также относительно небольшие по объему действия по обработке информации могут выполняться ПК. Большая ЭВМ осуществляет обмен информацией терминалами, исполняет крупномасштабные действия по переработке информации, поддержку больших баз данных.

Хотя интенсивность использования тех или иных информационных возможностей ПК находится в очевидной зависимости от режима его применения, попытка обрисовать наиболее важные из них представляется вполне выполнимой. Опишем в качестве информационных возможностей такие аппаратные и программные ресурсы, которые активно используются большинством пользователей ПК независимо от тех или иных особенностей архитектуры, от типа операционной системы и от выбора языка программирования. Бурный, едва ли не взрывной характер прогресса в технологии изготовления аппаратных средств современных ЭВМ ведет к быстрому устареванию сведений о любых «рекордных» достижениях

в объеме и быстродействии памяти, быстродействию процессоров и иных исполняющих устройств, скорости передачи данных и т. п. С другой стороны, направленность темы ставит во главу угла вместо «рекордов» характеристики сравнительно массовых современных персональных компьютеров. Именно о них будет в основном идти речь.

#### **4.1.1. Вычислительные ресурсы персонального компьютера [5]**

В этом разделе мы коснемся подробностей обработки персональным компьютером наименьших единиц, как бы «атомов» информации, работа с которыми относится к нижнему, базовому уровню аппаратного и программного обеспечения. Перед этим придется охарактеризовать их («атомов») основные типы.

Современные ЭВМ, и персональные ЭВМ в том числе, являются двоичными машинами, в которых программы и данные представляются последовательностью битов, т. е. двоичных разрядов. Но исключается в будущем появление троичных ЭВМ или спецпроцессоров ввиду определенных вычислительных преимуществ троичной арифметики наряду с наличием осуществимых физических принципов реализации (световые ЭВМ). На современных двоичных ЭВМ фактическим стандартом является использование в качестве основной единицы информации так называемого байта, состоящего из 8 битов.

В 8 битах можно закодировать 256 различных возможностей, что позволяет использовать объект размером в 1 байт для хранения одного символа «алфавитно-цифрового» типа. Обычно предусматривается кодировка в 1 байте больших и малых букв двух шрифтов, цифр, знаков препинания, знаков арифметических операций, пробела (пропуска между символами), неизображаемых символов, управляющих переходом на новую строку, и некоторого количества специальных символов, в том числе своеобразных «псевдографических» символов, предоставляющих возможность в рамках текстового режима изображать на экране горизонтальные и вертикальные линии, рамки, заштриховки и т. п.

Наряду с «алфавитно-цифровой» трактовкой однобайтного объекта возможна также его интерпретация в виде целого числа, могущего принимать 256 идущих подряд целых значений. Принимают два варианта подобного диапазона значений: от - 128 до 127 включительно и от 0 до 255 включительно. Если занумеровать двоичные разряды в порядке старшинства от 0 до 7, то в обоих вариантах для трактуемого целого значения  $b$  справедливо сравнение

$$\sum_{h=0}^7 b_h 2^k = b(\text{mod } 2^8). \quad (4.1)$$

Для первого варианта характерно, что отрицательные числа и только они имеют единицу в старшем, 7-м разряде. Таким образом, первый вариант соответствует интерпретации старшего бита как знакового: значению 0 отвечает знак «плюс» (включая сюда число 0), а значению 1 – знак «минус».

Следующий очень важный основной тип, поддерживаемый аппаратно на большинстве современных процессоров, – двухбайтное целое. Подобный объект интерпретируется как целое со знаком, принимающее значения от - 32 768 до 32 767 включительно, либо как беззнаковое целое, могущее изменяться в пределах 0 - 65 535. Если разряды занумерованы от 0 до 15, то в обоих случаях для целого  $i$  справедливо сравнение

$$\sum_{k=0}^{15} i_k 2^k = i(\text{mod } 2^{16}). \quad (4.2)$$

Как и для предыдущего примера, в первом варианте старший бит можно связать со знаком числа: отрицательные числа и только они имеют единицу в 15-м разряде. Указанное представление называется (двоично-) дополнительной кодировкой целых.

Наряду с «целочисленной» интерпретацией поддерживается также аппаратно интерпретация двухбайтового объекта как совокупности двоичных разрядов с набором основных естественных побитовых операций. Важность этих операций подтверждается возможностью их применения для реализации теоретико-

множественных действий над множествами, а также существованием высокоэффективных вычислительных алгоритмов (например, алгоритмы быстрой сортировки, так называемые быстрое преобразование Фурье, быстрое преобразование Фурье-Уолша и т. д.), активно использующих побитовые операции.

Еще одна чрезвычайно важная область применения побитовых операций – машинная графика. Видимое на экране растрового дисплея изображение есть осуществляемое дисплейным контроллером специфическое отражение содержимого определенного раздела оперативной памяти – так называемого буфера образа, или битовой карты. Каждой точке раstra дисплея соответствует определенная группа соседствующих битов в этом буфере. Набор значений этих битов задает цвет и яркость соответствующей точки дисплея. Поэтому программное формирование изображения на экране дисплея выглядит как применение нужных побитовых операций к однобайтным, двухбайтным или четырехбайтным объектам, расположенным в буфере образа.

Несколько интерпретаций может иметь объект, занимающий 4 байта. С одной стороны, это может быть целое со знаком, принимающее значение из диапазона от - 2 147 483 648 до 2 147 483 647 включительно (2 в степени 31 равно 2 147 483 648), либо целое без знака из диапазона 0 - 4294967295. Как и в предыдущем примере, применяется двоично-дополнительная кодировка с очевидной заменой константы  $2^{16}$  на  $2^{32}$ . С другой стороны, такой объект можно использовать как совокупность 32 двоичных разрядов и применять побитовые операции. Кроме того, 4 байта можно использовать для записи адреса какого-либо объекта в памяти, поскольку память рассматривается как одномерная последовательность байтов. Наконец, для представления машинного аналога вещественного числа также могут быть использованы 4 байта. Отметим, что в отличие от предыдущих интерпретаций 4-байтного объекта, последнюю, строго говоря, не следует считать поддерживаемой аппаратно, если на рассматриваемой ЭВМ не предусмотрено выполнение вещественных операций основным процессором или

каким-либо специализированным дополнительным устройством (сопроцессором).

Еще один важный тип данных – логический. Насчитывается два объекта этого типа: «истина» и «ложь». В языках низкого уровня (типа языка Ассемблера) обычно наличествуют команды вида «передача управления, если равно нулю» и «передача управления, если не равно нулю». На этом основании можно мыслить о соответствии «ложь» – «равно нулю» и «истина» – «не равно нулю», и что оно реализовано аппаратно.

Общепринятого стандарта на форматы вещественных машинных чисел, строго говоря, не существует.

Обратимся к «полноразрядным» машинным числам с плавающей точкой. В зависимости от наличия специального математического (со)процессора, обработка вещественных машинных чисел может производиться либо аппаратно (если сопроцессор есть), либо путем обращения к подпрограммам пакета поддержки операций с плавающей точкой и вычисления математических функций. Если вычисления с плавающей точкой играют существенную роль для данного конкретного пользователя, то можно порекомендовать ему приобрести соответствующее специализированное устройство. Оно может быть реализовано либо в виде отдельной электронной платы, либо как часть заполнения платы, либо в виде одной микросхемы (при условии, что в конструкции ЭВМ изначально предусмотрено место для этой микросхемы). К примеру, хорошо известные сегодня в мире персональные компьютеры IBM PC имеют специальное гнездо для математического сопроцессора i8087, реализованного в виде отдельной микросхемы. Этот сопроцессор обеспечивает выполнение около 30 тыс. сложений/вычитаний в секунду, приблизительно столько же умножений/с и на 30 % медленнее выполняет операции деления и извлечения квадратного корня. Предусмотрены различные режимы округления результатов операций: к ближайшему машинному числу, к ближайшему сверху, к ближайшему снизу и к ближайшему, не превосходящему по абсолютной величине. Реализованы все функции элементарной математики.

Сопроцессор имеет 8 внутренних ячеек памяти (регистров) для хранения нужных промежуточных и вспомогательных величин. Для регистров принято особое, внутреннее представление, отличающееся повышенной точностью и расширенным диапазоном порядков величины: количество значащих разрядов мантииссы равно 64, а количество разрядов, отведенных под знак и двоичный порядок числа, равно 16 (ср. с форматами (F), (D), (E1), (E2), не забывая о том, что в этих форматах один значащий разряд мантииссы «скрыт»). Некоторым недостатком этого сопроцессора является невозможность сэкономить время путем использования операций однократной точности, так как перед исполнением операции мантииссы операндов всегда удлиняются до 64-разрядной длины, принятой для внутренних регистров.

Говоря о вычислительных сопроцессорах, уместно упомянуть специализированные устройства, применяемые в цифровой обработке сигналов. Эти устройства работают с числовой информацией экспериментального происхождения, характеризуемой не очень высокой точностью и ограниченным сверху порядком величины чисел. В таких случаях целесообразно использовать арифметику машинных целых, причем обычно достаточно ограничиться 16-разрядными целыми. Здесь может быть использован быстродействующий периферийный процессор, который ориентирован на обработку больших массивов данных и эффективное выполнение матричных и векторных арифметических операций. Скорость выполнения арифметических операций составляет 50 млн сложений/с и 25 млн умножений/с. Предусмотрена двойная точность, т. е. работа с 32-разрядными целыми. Функции БПП реализуются микропрограммно. Они спроектированы таким образом, чтобы обеспечить эффективную реализацию векторно-матричных операций сложения и умножения, оценок корреляционной функции, быстрых алгоритмов прямого и обратного преобразований Фурье.

#### 4.1.2. Информационные возможности персонального компьютера [6]

В настоящее время нет недостатка в литературе, освещающей устройство различных персональных компьютеров. Поэтому техническая сторона будет здесь затронута преимущественно с точки зрения непрограммирующего профессионала, как бы говорящего: «Ну хорошо, я верю, что все это как-то работает, но не интересуюсь техническими деталями. Я хочу понять, какую пользу можно извлечь из этого для моей профессиональной деятельности?»

Как известно, микропроцессор – еще не ЭВМ. МикроЭВМ, кроме микропроцессора, включает обычные и/или программируемые постоянное и оперативное запоминающие устройства (ПЗУ и ОЗУ) относительно большого объема, каналы связи с устройствами ввода-вывода и схемы синхронизации всех этих устройств. ПК - это микроЭВМ, оснащенная периферийными устройствами для ввода, вывода и запоминания управляющих команд, информационных сообщений и данных. В обычной конфигурации ПК укомплектован следующими устройствами:

- так называемый системный блок, содержащий основные электронные компоненты ПК: канал обмена информацией, микропроцессоры, постоянную и оперативную память, контроллеры ввода и вывода и др.;
- клавиатура, служащая для ввода в систему управляющих команд и данных для обработки;
- дисплей, на экране которого в виде текстов, графиков, изображений и т. п. отображается ход обработки информации и возможности воздействия на него;
- печатающее устройство (принтер) для получения текстовых, табличных и графических документов, а также изображений на бумаге;
- устройства внешней памяти в виде одного или нескольких накопителей на гибких и/или жестких магнитных дисках.

Возможны дополнительные устройства ввода, вывода и переработки информации. Это различные манипуляторы, специализированные процессоры, графопостроители, коммуникационные устройства для модуляции-демодуляции сигналов, для связи с информационной сетью, аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи и т. п.

Относительно микропроцессора можно, вероятно, предположить, что непрограммирующий профессионал вряд ли склонен очень дотошно вникать в детали его устройства и функционирования. Скажет ли ему что-либо аббревиатура KM1810BM86 или словосочетание «микропроцессорный набор серии K1811»? Между тем, первый есть базовый 16-разрядный микропроцессор отечественных ПК ЕС 1840, ЕС 1841, совместимых с IBM PC и IBM PC/XT, имеющих быстродействие до 1.2 млн операций/с, тогда как упомянутый микропроцессорный набор составляет сердцевину микроЭВМ MC 0585 «Электроника 85», совместимой с СМ ЭВМ и имевшей быстродействие 800 тыс. операций/с. Следует, по-видимому, предостеречь читателя от чисто механического сопоставления чисел 1.2 млн и 800 тыс. Названные ЭВМ существенно различаются во всех отношениях и, в частности, в устройстве команд процессора, причем в функциональном отношении одна команда «Электроники 85» в среднем значительно объемнее команды ЕС 1841 (ЕС 1840). Быстродействие типичных современных ПК находится в диапазоне от нескольких сот тысяч до нескольких миллионов операций/с. Отметим, что в подсчет быстродействия ПК не включают операции вещественной машинной арифметики. Причина в том, что значительная доля современных пользователей не испытывает острой необходимости в таком дорогостоящем ресурсе, как быстрая вещественная арифметика и основные функции вычислительной математики. Поэтому аппаратная реализация основ вычислительной математики не входит в основной комплект поставки, а характеристики этих устройств – в число основных характеристик персонального компьютера.

Соответствующие устройства (микросхемы или платы) поставляются обычно по дополнительному заказу.

Очень важный для пользователя ресурс – объем оперативной памяти. Для типичных современных персональных компьютеров объем оперативной памяти составляет от нескольких десятков Кбайт до нескольких тысяч Кбайт. Так, упоминавшиеся в предыдущем абзаце ЕС 1840, ЕС 1841 имеют минимально возможную оперативную память 256 Кбайт, причем можно нарастить ее до 640 Кбайт. «Электроника 85» поставляется с оперативной памятью 512 Кбайт, имея объем адресного пространства памяти 4096 Кбайт. Это позволяет пользователю располагать при необходимости более чем 2000 Кбайт. В принципе пользователь может расширить используемую оперативную память почти до 4096 Кбайт, что потребовало бы внесения незначительных изменений в конструкцию.

Здесь и ниже мы пользуемся широко распространенной единицей количества информации - байтом и производной от нее - килобайтом (обозначается Кбайт; заметим, что 1 Кбайт равен не 1000 байтам, а  $1024 = 2^{10}$  байтам). Байт равен 8 битам. В смысле этого определения можно понимать 1 байт как место, необходимое для размещения восьми независимых признаков типа «да-нет» или «ноль-один». В данном контексте можно считать, что для хранения одной литеры текста требуется 1 байт, так что, например, одна страница машинописного текста (считая 30 строк по 60 позиций в строке) займет примерно 1800 байтов, т. е. 1,75 Кбайт. Специалист-вычислитель может заинтересоваться, какой объем памяти потребуется для размещения, скажем, 1000 чисел. Тогда ему нужно знать, что одно вещественное машинное число однократной точности, имеющее 7 значащих десятичных цифр, занимает 4 байта, а вещественное машинное число двойной точности, имеющее не менее 15 значащих цифр - 8 байтов. Таким образом, для размещения 1000 чисел однократной точности требуется 4000 байт, или около 3,9 Кбайт, а 1000 чисел двойной точности занимает 8000 байт, или около 7,8 Кбайт.

С внешним миром ПК связан несколькими путями. Это клавиатура (только для ввода), дисплей, генератор звука, принтер (последние три – только для вывода), дисководы, информационные каналы и сети и некоторые другие устройства. Выделенное положение занимает клавиатура. Ее удобству, эргономичности придается большое значение. Кроме ввода команд операционной системы, в том числе запуска программ на исполнение, с клавиатуры происходит ввод информации (числовых и иных данных, текстов документов и программ), а также управляющих воздействий в диалоговом режиме исполнения программ. Устройство клавиатуры и способ интерпретации нажатий клавиш позволяют воспринимать не только нажатия отдельных клавиш, но также многие комбинированные нажатия. На клавиатуре размещены клавиши больших и малых букв, цифр, различных знаков. Имеются различные функциональные клавиши, нажатия на которые естественным образом используются для переключения режимов обработки информации (примеры: переключение с одного шрифта на другой, смена алфавитно-цифрового режима дисплея на графический и т. д.). Неотъемлемой частью клавиатуры сегодня являются стрелки управления, основное использование которых – управление перемещением курсора. (Курсор – обобщающий термин, обозначающий указатель выделенной позиции на экране: точки, литеры, окна меню и т. п.) Возможности типа стрелок управления значительно усиливаются специальными устройствами-манипуляторами типа «мышь» (*mouse*), двухкоординатной ручкой (*joystick*), планшетными манипулятором. Первый из них позволяет преобразовать механическое перемещение в эквивалентную последовательность многократных нажатий стрелок; во втором манипуляторе сигналообразующую роль играет отклонение рычага в любую желаемую сторону от вертикального положения; третий позволяет позиционировать курсор в соответствии с положением чувствительного элемента на специальном прямоугольном планшете.

Оперативный вывод информации, в первую очередь для оценки текущей ситуации и принятия решений, осуществляется на экран дисплея (монитора). Первые ЭВМ работали в пакетном режиме, исключая необходимость в использовании дисплея. В дальнейшем развитие тенденции к диалоговости привело к использованию алфавитно-цифровых дисплеев, дающих черно-белое изображение только текстов: вводимые команды, выводимые сообщения ЭВМ, редактируемые программные тексты. На современном этапе широко применяются графические дисплеи, позволяющие формировать на экране любые изображения (но также и тексты). Возможности многооконного интерфейса позволяют как бы совместить несколько различных экранов на одном дисплее. Физически экран графического дисплея осуществляется на монохромной или цветной электронно-лучевой трубке, подобно экрану телевизора. Применяются также (преимущественно в портативных ПК) экраны, основанные на свойствах жидких кристаллов, подобно жидкокристаллическому индикатору наручных электронных часов, а также «плазменные» экраны, составленные из очень большого количества (например,  $640 \times 200$ ) миниатюрных световых индикаторов, подобных неоновой лампочке.

Очень важно, чтобы устройство и размещение дисплея удовлетворяло требованиям охраны здоровья работающего. Независимо от конструкции экрана и схемы управления им, «логически» поле экрана представляет собой растровую сетку из точек. Набор возможных уровней яркости и цветов определяется типом дисплея и заданным режимом. Например, один из самых распространенных типов дисплея имеет текстовый, цветной графический и монохромный графический режимы. В текстовом режиме экран вмещает 25 строк по 80 символов с разнообразными возможностями для вывода каждого символа: цвет фона, цвет контура символа, интенсивность, прямая или обратная контрастность, мигание или отсутствие мигания. В цветном графическом режиме поле экрана состоит из  $320 \times 200$  точек: 200 горизонтальных линий по 320 точек в каждой. Любая точка имеет один из четырех цветов; таких четырех-

цветных наборов – два. В монохромном графическом режиме количество горизонтальных линий то же, однако каждая линия содержит 640 точек. Цвет один для всех точек экрана, но есть возможность выбрать этот цвет. На многих современных дисплеях крайняя малость отдельной точки предоставляет возможность объединять их в группы по несколько и считать «истинной точкой» такую группу, получая при этом огромное разнообразие цветов и уровней яркости. Так, современный цветной графический дисплей для микроЭВМ семейства «Электроника» изображает  $1024 \times 240$  точек, набор цветов точки состоит из восьми цветов, и есть возможность выбирать из различных наборов. Объединяя каждые две соседние горизонтальные точки в пару, получим  $512 \times 240$  таких более крупных точек, причем набор цветов такой «истинной точки» будет намного богаче. Отметим, что монохромный дисплей для этих же микроЭВМ изображает  $1024 \times 240$  точек при 8 уровнях интенсивности. Изображение, получаемое на растровом дисплее, называют тоновым, поскольку контуры фигур на экране образуются благодаря перепадам цвета и яркости точек раstra.

Использование встроенного в ПК генератора звука может заметно повысить эффективность работы. Его реализация и включение в архитектуру ПК таковы, что можно извлекать различные мелодии, мелодичные и немелодичные звуки параллельно с обработкой информации и не в ущерб скорости этой обработки. При определенном навыке работы по одному только звуковому сопровождению можно иногда следить за общим ходом вычислений, находясь даже на удалении от ПК. Звук, его окраска могут оперативно оповестить о ненормальном ходе вычислений, требующем внимания и, быть может, даже вмешательства человека. Но дело не только в этом. Адекватные визуализация и озвучивание процесса обработки информации способны существенно ослабить элементы рутинны и придать работе разумную игровую окраску. Появление зримых, в цвете и движении звучащих образов способно возбудить мощные пласты сознания, обострить внимание и интерес, дать толчок воображению и раскрепостить творческие способности.

Можно поэтому сказать, что клавиатура, манипуляторы, графический дисплей и звуковой генератор, взятые вместе, составляют основу для реализации сравнительно новых идей человеко-машинного интерфейса (взаимодействия). Многие разработчики диалоговых систем стремятся сделать язык команд системы максимально приближенным к естественному не только по синтаксису, но иногда также и в отношении физической реализации (речевой ввод-вывод). Одна из основных трудностей при таком подходе – присущее естественным языкам сочетание избыточности и неоднозначности одновременно. Этой и других трудностей можно избежать, устранив из диалоговой системы сам диалог как таковой. Альтернативный подход, известный под наименованием объектно-ориентированного, в большей степени соответствует упомянутым аппаратным возможностям. Последовательное развитие этого подхода ведет к исчезновению из диалога команд как таковых вместе с сопутствующими понятиями синтаксиса команды, параметров команды. Одновременно с исчезновением команд, адресованных системе, из поля зрения работающего уходит также и сама диалоговая система как самостоятельно существующий посредник между человеком и решаемой задачей. Присутствие системы неявно выражается в предлагаемых ею возможностях и подсказках, но эти возможности принимают вид набора инструментов или рычагов воздействия на задачу, а подсказки выглядят как анонимные или исходящие от самой задачи. Получается, что человек взаимодействует с задачей, а не с системой: откликается задача, а не система. Воздействие и отклик имеют непосредственный характер в соответствии с формулой «То, что вы сейчас видите, и есть то, что вы сейчас имеете». Непосредственное воздействие по возможности быстро влечет видимый/слышимый результат, и все это должно соответствовать существенным сторонам задачи и интуитивным представлениям человека. По истечении некоторого времени работы человек настолько осваивается с задачей, что начинает жить ее жизнью, вырабатывает специфические именно для этой задачи понятия, образы и моторные навыки, приобретает новые взгляды и полезные идеи.

Малогабаритное печатающее устройство (принтер) служит для вывода информации на бумагу с созданием документа. Физико-технические принципы, на которых основывается работа современных принтеров, довольно различны. Общим является отсутствие принципиальных ограничений на вид получаемого документа. Это может быть текст, таблица, график, рисунок. Уже существуют принтеры, на которых можно получать цветные иллюстрации, причем по качеству изображения эти принтеры не уступают полиграфскому оборудованию (но уступают, разумеется, в отношении скорости репродукции). Для печати документа, состоящего лишь из текста и таблиц, предусматривается специальный «текстовый» режим работы, что намного ускоряет формирование текста. Имеются возможности управления шрифтом (смена, формирование нового шрифта), а также печатания более мелким шрифтом, в частности в позиции индекса или показателя степени.

Дисководы служат для обмена информацией со специальными магнитными носителями информации - так называемыми дискетами, гибкими магнитными дисками. Использование именно дискет для накопления, модификации, хранения, транспортировки программ и данных на сегодня очень распространено. Несколько типов дискет выделилось в качестве фактических стандартов:

- один из самых распространенных типов - дискета диаметром 133 мм (5.25 дюйма), емкостью 160-720 Кбайт (емкость зависит от типа ЭВМ, на которой производится чтение-запись);
- значительна и имеет тенденцию к росту распространенность гибких магнитных дисков (в жесткой оболочке) диаметром 89 мм (3.5 дюйма), емкостью 720 Кбайт и более;
- дискета диаметром 203 мм (8 дюймов), объемом 500-1200 Кбайт;
- существуют также гибкие магнитные диски диаметром 3 дюйма в жесткой оболочке, которые не только не уступают вышеперечисленным в отношении емкости, но даже, по-видимому, в будущем существенно превзойдут.

Накопитель на жестком магнитном диске (если имеется) обычно встроен в корпус системного блока ПК. Блок накопителя имеет габариты около  $20 \times 15 \times 9$  см<sup>3</sup>. Благодаря поддерживаемому вакууму и высокоточной механике этот накопитель отличается значительно большей скоростью записи/считывания и значительно большей плотностью записи. Его объем - от 5000 до 40 000 Кбайт и более. Очень полезным должно оказаться ожидаемое в будущем появление оптических дисков без возможности перезаписи информации. На них могут быть размещены обширные базы данных справочного характера, тиражированные промышленным способом, что экономически окажется более оправданным, нежели использование в справочных целях сложных сетей ЭВМ. В настоящее время имеются публикации о появлении технических возможностей перезаписи информации на оптические диски.

Информационная связь между двумя ПК может осуществляться через последовательный асинхронный канал связи. Канал называется последовательным, потому что информационные биты передаются поочередно, и асинхронным, потому что передача информации производится без синхронизации импульсов. Так как на связанных канале ЭВМ внутреннее время течет по-разному (хотя бы из-за несовпадения тактовых частот), то требуются специальные приемы для правильного распознавания передаваемых порций информации. Из-за этого скорость передачи информации не очень велика, зато не требуется никаких дополнительных аппаратных затрат. Если же объединять персональные компьютеры в локальную информационную сеть, что осуществляется через специальные интерфейсы, то скорость передачи данных достигнет нескольких тысяч Кбайт/с. Локальная сеть позволяет интегрировать информационные и аппаратные ресурсы в пределах одного или нескольких близко расположенных производственных помещений, не исключая при этом защиты информации от несанкционированного доступа. Пользователям предоставляются услуги электронной почты. Возможна связь ЭВМ посредством телефонной сети. Для преобразования сигналов в рабочий диапазон частот телефон-

ной сети служат специальные устройства – модемы (от слов модулятор – демодулятор). В модемах используются разные полосы частот для передачи в каждом из двух направлений. Отметим лишь, что поскольку все эти частоты – звуковые, то через модемы можно записывать данные прямо на обычный магнитофон.

Применение ПК может включать анализ физических сигналов, а также их формирование. Для перевода сигнала, имеющего «непрерывную» природу, в дискретную форму, приемлемую для цифровой ЭВМ, служат подключаемые в ЭВМ через специальный интерфейс аналого-цифровые преобразователи. Обратное: сформированный в ЭВМ сигнал, имеющий вид последовательности чисел конечной точности (в сущности, просто целых чисел), преобразуется в непрерывный сигнал посредством цифроаналогового преобразователя. Для подключения произвольных внешних устройств к ПК предусмотрен специальный так называемый приборный интерфейс, или интерфейс пользователя.

Характерной особенностью ПК является возможность гибкого маневрирования ресурсами. При выполнении естественного условия совместимости достаточно иметь систему программирования, интегрированную прикладную систему или пакет прикладных программ, записанных на дискете (дискетах), для того чтобы можно было ими немедленно пользоваться. Маневрировать можно не только программными ресурсами, но также и аппаратными. Во время приобретения ПК или позже, в период эксплуатации, можно по мере надобности добавить, убрать или заменить в его конфигурации различные устройства, например, плату с дополнительной оперативной памятью, манипулятор, графопостроитель, сопроцессор для быстрой обработки машинных чисел с плавающей точкой, дисковод для гибкого магнитного диска и т. п. Можно заменить дисплей или принтер на улучшенную модель, включить ПК в локальную сеть или подключить его к телефонной сети. При использовании в научно-технических экспериментах возможно подключение к измерительной аппаратуре.

Имеет смысл подчеркнуть, что в принципе этот перечень не ограничен.

Технически подключение устройства осуществляется установкой в корпус системного блока соответствующей электронной платы. Плата вставляется в зажим (слот), в котором расположены также контакты для связи ее с информационным каналом (системной шиной) микроЭВМ. Для связи с внешним устройством служит установленный на плате соответствующий разъем, выходящий наружу системного блока. Количество зажимов (слотов) невелико, не превосходит всего нескольких единиц, и пользователи персональных компьютеров начинают в полной мере ценить возможности гибкого маневрирования ресурсами. Растет ценность каждого слота в глазах пользователя. Косвенными подтверждениями этому могут служить публикации рекламного характера о выпусках плат, буквально перенасыщенных электронными схемами, реализующими различные функциональные возможности.

Промежуточное место между программными и аппаратными ресурсами занимают так называемые виртуальные устройства. В качестве примера рассмотрим виртуальный диск и виртуальный принтер. Виртуальный диск (электронный диск, псевдодиск) можно рассматривать как аппаратно-программную имитацию дополнительно подключенного реального дисководов, неотличимую с точки зрения операционной системы. Так как информационное пространство виртуального диска составляется из таких же интегральных схем, что и оперативная память, то подмена реального магнитного накопителя информации виртуальным приводит к существенному ускорению всех операций чтения/записи и иных файловых операций и уменьшает износ механических частей. Аналогично виртуальный принтер, т. е. аппаратно-программная имитация принтера, сокращает затраты времени на операции распечатки документов. Виртуальный принтер принимает, как в буфер, в свою собственную оперативную память информацию, которую нужно распечатать, и уже сам передает ее на реальный принтер, высвобождая тем самым ресурсы ЭВМ для текущей работы.

### 4.1.3. Профессионал-непрограммист вместо программиста-профессионала

Книга Г.Р. Громова «Национальные информационные ресурсы» содержит интересные данные о динамике изменения основных показателей информационной техники [7]. Оказывается, за 10 лет:

- суммарная производительность (количество машинных операций в секунду) всей произведенной вычислительной техники возрастает в 400 раз;
- суммарная емкость запоминающих устройств возрастает в 4000 раз;
- удельная стоимость машинной операции падает в 100 раз;
- удельная стоимость ячейки памяти падает в 1000 раз.

Это связано с тем, что повышаются характеристики отдельно взятой интегральной схемы. В литературе имеются данные о том, что количество транзисторов в одном кристалле удваивается за год и может достигнуть порядка сотен миллионов в 1990-е годы. Неизбежные для подобных оценок погрешности вряд ли могут изменить эту картину в существенном. Основное в этой картине - довольно непривычное сочетание быстро прогрессирующего повышения характеристик производительности с быстрым понижением стоимостных характеристик.

Следствием такой динамики явилась радикальная переоценка ценностей. Времена первых ЭВМ требовали всемерной экономии времени и памяти ЭВМ, невзирая на трудозатраты людей, занятых подготовкой заданий для исполнения ЭВМ. Эта установка определялась крайней дороговизной машинных ресурсов. В дальнейшем происходило ее изменение в сторону большей гуманизации. Первые шаги в этом направлении связаны с формированием языков высокого уровня. Затем последовало развитие машинных диалоговых систем программирования и ввода данных; диалог происходил в «многозадачном режиме» на фоне счета других задач. Современная тенденция состоит в стремлении к такому идеалу, когда все, что в принципе могла бы исполнить ЭВМ, исполняет именно ЭВМ,

оставляя на долю человека присущее именно человеку – концептуальное мышление, творчество.

В развитие этой тенденции ПК отличаются невиданной ранее доброжелательностью по отношению к пользователю. Приобрело популярность словосочетание «дружественное программное обеспечение» (friendly software). В сущности, можно говорить о дружественности также и аппаратных ресурсов ПК. На этой основе стала уничтожаться дистанция между ЭВМ и ее конечным пользователем. Конечными пользователями ЭВМ являются те специалисты (или тот специалист) в проблемной области, которые дают окончательные оценки полученным на ЭВМ результатам, делают практические выводы на основе этих результатов, формируют желательные модификации целей расчетов. Если ЭВМ используется для физических расчетов, то конечный пользователь - ученый-физик; в случае машинной диагностики заболеваний конечный пользователь - лечащий врач и т. п.

Дистанция между конечным пользователем и ЭВМ определялась необходимостью переводить с достаточно абстрактного концептуального языка пользователя на один из немногих языков программирования при почти неизменном наличии пространственных, временных и чисто технических сложностей, включая сюда также сложности общения с операционной системой ЭВМ. Связь между конечным пользователем и ЭВМ осуществлялась через работников, профессионально занимающихся программистской деятельностью - программистов-профессионалов. Уничтожение указанной дистанции, возможность непосредственной работы профессионала-непрограммиста на ЭВМ ведет к существенному повышению пользы от внедрения информационной техники. Сокращается временной цикл уточнения требований к разрабатываемым программным системам. Становятся более ясными и конкретными пожелания об усовершенствовании системы. Быстрее и точнее улавливаются неправильности в работе. Реализуются такие возможности системы, которые ранее были просто неосуществимы из-за трудности разъяснить их суть специалисту в программировании.

Прямое общение профессионала-непрограммиста с ЭВМ не умалает труд программиста-профессионала. Разумеется, для грамотной, профессиональной реализации любой системы на ЭВМ необходимо участие специалиста с высокой программистской квалификацией. Век ПК принес, однако, новую расстановку акцентов. Современный пользователь ПК имеет дело с иными программистскими проблемами, нежели «первопрограммисты» начала эры ЭВМ. Ныне значительная часть математических и иных хорошо формализуемых задач давно и успешно освоена составителями алгоритмов и программ. Сами задачи этого класса составляют сравнительно малую долю в ряду проблем, решаемых современным пользователем. Техника программирования, понимаемого только как перевод с человеческого языка на язык ЭВМ, сегодня уже не может считаться самым «узким местом» в процессе формализации задачи для ее решения с помощью ЭВМ. В силу значительного повышения степени неформальности актуальных на сегодня задач центр тяжести трудозатрат перемещается от собственно программирования в сторону деятельности по правильной постановке задачи на программирование, по выработке требований (спецификаций) на программный продукт.

#### **§ 4.2. Совершенствование средств и методов управления сложными объектами или процессами**

В еще большей степени персональные компьютеры (ПК) способны изменить условия работы специалистов в таких инженерных и научных областях, как:

- автоматизация проектирования;
- управление технологическими процессами;
- моделирование экологических систем и т. д.

В частности, развитие и совершенствование средств и методов управления сложными динамическими системами пришло к возможности использования персональных компьютеров (ПК) для создания информационно-измерительных систем (ИИС).

### **4.2.1. Информационно-измерительные системы**

Информационно-измерительной системой (ИИС) называют совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств для получения измерительной информации, ее ввода в автоматизированную систему управления (АСУ) с целью преобразования и обработки для автоматического осуществления логических функций измерения, контроля, диагностирования, идентификации и принятия решений.

Любая ИИС обладает необходимыми функциональными возможностями, технические и другие характеристики в решающей степени определяются объектом исследования, для которого данная система создается.

#### ***Назначение и виды ИИС***

Измерительные информационные технологии являются разновидностью информационных технологий и выделяются из этого обширного множества тем, что носят очевидный познавательный характер и реализуют специфические процедуры, присущие только им:

- получение исходной измерительной информации в результате взаимодействия первичных измерительных преобразователей (сенсоров) с объектом измерений;
- преобразование измерительной информации с заданной и гарантированной точностью;
- сопоставление сигналов измерительной информации с размерами общепринятых единиц измерения, оценка и представление характеристик остаточной неопределенности значений измеряемых величин [9].

Современные измерительные информационные технологии приобретают дополнительные свойства благодаря использованию аппаратных и программных средств искусственного интеллекта. Одной из важнейших задач развития измерительных информационных технологий является расширение номенклатуры измеряемых

величин, обеспечение измерений в условиях воздействия «жестких» внешних факторов (высокая температура, большое давление, ионизирующее излучение и т. д.).

Решение подобных задач связано с усложнением структуры используемых средств измерений (СИ); созданием комплексов взаимосвязанных СИ и технических средств, необходимых для их функционирования. Современные объекты исследования характеризуются большим количеством параметров, изменяющихся подчас с большой скоростью.

Иногда, чтобы получить информацию о параметрах объекта, необходимо проводить комплексные измерения, а значение измеряемой величины получать расчетным путем на основе известных функциональных зависимостей между ней и величинами, подвергаемыми измерениям [8; 9; 10].

Указанные задачи успешно решаются с помощью информационных измерительных систем (ИИС), получивших широкое распространение. В настоящее время нет общепринятого однозначного определения, что такое ИИС. Среди существующих подходов к рассмотрению понятия ИИС следует выделить два основных.

Сущность одного подхода отражена в рекомендации по межгосударственной стандартизации РМГ 29-99 «ГСИ. Метрология. Основные термины и определения», в которой ИИС рассматривается как разновидность измерительной системы (ИС). В пункте 6.14 РМГ 29-99 приведено следующее определение.

Измерительная система - совокупность функционально объединенных мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей, ЭВМ и других технических средств, размещенных в разных точках контролируемого объекта и т.п. с целью измерений одной или нескольких физических величин, свойственных этому объекту, и выработки измерительных сигналов в разных целях.

## **Примечания**

*1. В зависимости от назначения измерительные системы разделяют на измерительные информационные, измерительные контролирующие, измерительные управляющие системы и др.*

*2. Измерительную систему, перестраиваемую в зависимости от изменения измерительной задачи, называют гибкой измерительной системой (ГИС).*

## **Примеры:**

*1. Измерительная система теплоэлектростанции, позволяющая получать измерительную информацию о ряде физических величин в разных энергоблоках. Она может содержать сотни измерительных каналов.*

*2. Радионавигационная система для определения местоположения различных объектов, состоящая из ряда измерительно-вычислительных комплексов, разнесенных в пространстве на значительное расстояние друг от друга.*

На практике почти повсеместно применяется термин «информационно-измерительная система», который, по мнению ряда видных метрологов, неверно отражает понятие об измерительной информационной системе.

При образовании термина метрологического характера на первом месте должен указываться основной терминологический элемент (в данном случае - измерительная), затем – дополнительный (информационная). Это положение и отражено в примечании к приведенному выше определению.

Сущность второго подхода отражена в определениях, приведенных в рекомендации МИ 2438-97 «ГСИ. Системы измерительные. Метрологическое обеспечение. Основные положения».

Измерительная система – совокупность определенным образом соединенных между собой средств измерений и других технических устройств (компонентов измерительной системы), образующих измерительные каналы, реализующая процесс измерений и обеспечивающая автоматическое (автоматизированное) получе-

ние результатов измерений (выражаемых с помощью чисел или соответствующих им кодов) изменяющихся во времени и распределенных в пространстве физических величин, характеризующих определенные свойства (состояние) объекта измерений [10].

### **Примечания**

*1. Измерительные каналы могут входить в состав как автономных измерительных систем, так и более сложных систем: контроля, диагностики, распознавания образов, других информационно-измерительных систем, а также автоматических систем управления технологическими процессами. В сложных системах целесообразно объединять измерительные каналы в отдельную подсистему с четко выраженными ее границами как со стороны входа (места подсоединения к объекту измерений), так и со стороны выхода (места получения результатов измерений).*

*2. Измерительные системы обладают основными признаками средств измерений и являются их специфической разновидностью. ИС рассматривается как составная часть более сложных структур - ИИС, которые могут реализовывать следующие функции: измерительные информационные, логические (расознавания образов, контроль), диагностики, вычислительные.*

Необходимо отметить один важный момент, отраженный в пункте 2 примечания к определению, данному в МИ 2438-97. ИС (а также и ИИС) рассматриваются как разновидность СИ. Согласно пункту 1 примечания к тому же определению, в сложных системах рекомендуется объединять измерительные каналы в отдельную подсистему с четко выраженными границами. Последнее обстоятельство связано с одной из особенностей ИИС.

Комплектация ИИС как единого, законченного изделия из частей, выпускаемых различными заводами-изготовителями, часто осуществляется только на месте эксплуатации.

В результате этого может отсутствовать заводская нормативная и техническая документация (технические условия), регламентирующая технические, в частности, метрологические требования

к ИИС как единому изделию. Соответственно, возникают трудности с проведением испытаний для целей утверждения типа.

Возможность развития, наращивания ИИС в процессе эксплуатации или возможность изменения ее состава (структуры) в зависимости от целей эксперимента, по существу, затрудняет или исключает регламентацию требований к таким ИИС в отличие от обычных СИ, являющихся «завершенными» изделиями на момент выпуска их заводом-изготовителем.

Для обеспечения соответствующей регламентации и осуществляется выделение подсистем в рамках более сложной ИИС. При дальнейшем изложении под сокращением ИИС будет пониматься термин *«информационно-измерительная система»* как наиболее распространенный и применяемый в МИ 2438-97. Название *«информационная»* указывает:

– на конечный продукт, получаемый при помощи ИИС. Конечным продуктом является именно информация – экспериментальная количественная информация о состоянии материальных объектов и о процессах, протекающих в них, будь то сырье, готовые промышленные изделия, природные процессы или живые организмы;

– на принадлежность ИИС к более широкой области – информационной технике. Эта более широкая область имеет и другие составные части. Среди них - вычислительная техника, техника связи и хранения информации, которые могут по отношению к ИИС являться потребителем информации, а могут и входить в состав ИИС. ИИС связывает мир физический с миром цифр и других знаков, из которых строятся математические формулы, различные сообщения и программы для ЭВМ.

Основной процесс эмпирического познания – измерение, при помощи которого получается первичная количественная информация. Поэтому к понятию *«информационная»* добавляется уточняющее *«измерительная»*.

Одним из условий рассмотрения СИ как системы является необходимость и целесообразность изменений его структуры. Изменения могут осуществляться как от применения к применению (многофункциональная система), так и в процессе применения (управляемая или адаптивная системы).

Если структура СИ неизменна и условия его использования остаются одинаковыми в течение периода эксплуатации, возможно определить модель СИ типа «вход-выход». Например, многоканальные электронные СИ для измерения температуры серии 5150 фирмы *Guildline* имеют нормированные МХ, и, с точки зрения потребителя, не рассматриваются с системных позиций.

Автоматизация также не обязательно связана со структурированностью СИ, трактуемого как система. Компактный прибор, рассматриваемый как единое изделие, может быть высоко автоматизированным.

Примером может быть современный цифровой вольтметр, в котором реализуются в автоматическом режиме функции выбора метода измерений, установления диапазона измерений и периодической самодиагностики.

Уточняющее понятие «система» указывает на необходимость учета сложности структуры СИ, даже в том случае, если оно является одноканальным.

В развитии ИС можно выделить два этапа, граница между которыми определяется включением в состав систем средств вычислительной техники.

На первом этапе структура и функции системы однозначно согласованы, и измерительная функция является определяющей. Информационные функции, связанные с отображением результатов измерений, рассматриваются как вспомогательные.

На втором этапе система становится информационной в широком смысле, т. е. позволяет реализовать не только измерительную, но и другие информационные функции. Результатом является создание ИИС, которые предназначены для выполнения на основе измерений функций контроля, испытаний, диагностики и др. [9].

Развитие ИИС целесообразно рассматривать в двух аспектах: структурном и функциональном.

Первый отражает интегрирование различных подсистем, широкое использование средств вычислительной техники, что приводит к возникновению систем с гибкой структурой.

Второй аспект характеризует резкое возрастание числа функций, выполняемых системой. При этом центр тяжести переносится с измерительных функций на другие информационные функции, связанные с использованием результатов измерений.

Таким образом, в ИИС измерение во все большей степени становится неразрывно связанным с другими функциями (логической обработки, анализа результатов измерений и др.), и его выделение не всегда возможно.

Учитывая приведенные выше особенности ИИС, можно дать два следующих определения ИС и ИИС в широком смысле.

Измерительная система – система средств измерений и вспомогательных технических средств, представляющая собой средство измерений.

Измерительная информационная система – информационная система, состоящая из информационных средств, включая средства измерений, и вспомогательных технических средств, в которой измерительная информация преобразуется в другие виды информации [10].

Наиболее крупной структурной единицей ИИС, для которой могут нормироваться метрологические характеристики (МХ), является измерительный канал (ИК). Он представляет собой последовательное соединение СИ, образующих ИИС (некоторые из этих СИ сами могут быть многоканальными, в этом случае следует говорить о последовательном соединении ИК указанных СИ).

Такое соединение СИ, предусмотренное алгоритмом функционирования, позволяет выполнять законченную функцию от восприятия измеряемой величины до индикации или регистрации результата измерений включительно, или преобразование его в сигнал, удобный для дальнейшего использования вне ИИС, для ввода

в цифровое или аналоговое вычислительное устройство, входящее в состав ИИС, для совместного преобразования с другими величинами, для воздействия на исполнительные механизмы.

Типовая структура ИК включает в себя первичный измерительный преобразователь, линии связи, промежуточный измерительный преобразователь, аналого-цифровой преобразователь, процессор, цифроаналоговый преобразователь.

Различают простые ИК, реализующие процедуру измерения какой-либо величины, и сложные ИК, реализующие процедуры измерения нескольких величин и получение искомой величины расчетным путем на основе известных функциональных зависимостей между измеренными и рассчитываемой величинами. Начальная часть сложных ИК разделяется на несколько простых ИК, например, при измерениях мощности в электрических сетях начальная часть ИК состоит из простых каналов измерений электрического напряжения и тока.

Упрощенная структура ИИС, предложенная профессором В.А. Грановским, приведена *на рис. 4.1*.

Учитывая многоканальность ИИС, использование одних и тех же устройств в составе различных ИК, последние можно выделить зачастую только функционально, и их конфигурация реализуется программным путем.

Протяженность ИК может составлять от нескольких метров до нескольких сотен километров. Число ИК – до нескольких тысяч. Информация от первичных преобразователей передается обычно при помощи электрических сигналов (реже - пневматических) – ток, напряжение, частота следования импульсов. В некоторых областях измерений современные первичные измерительные преобразователи имеют цифровой код. При большой протяженности ИК используются радиосигналы.

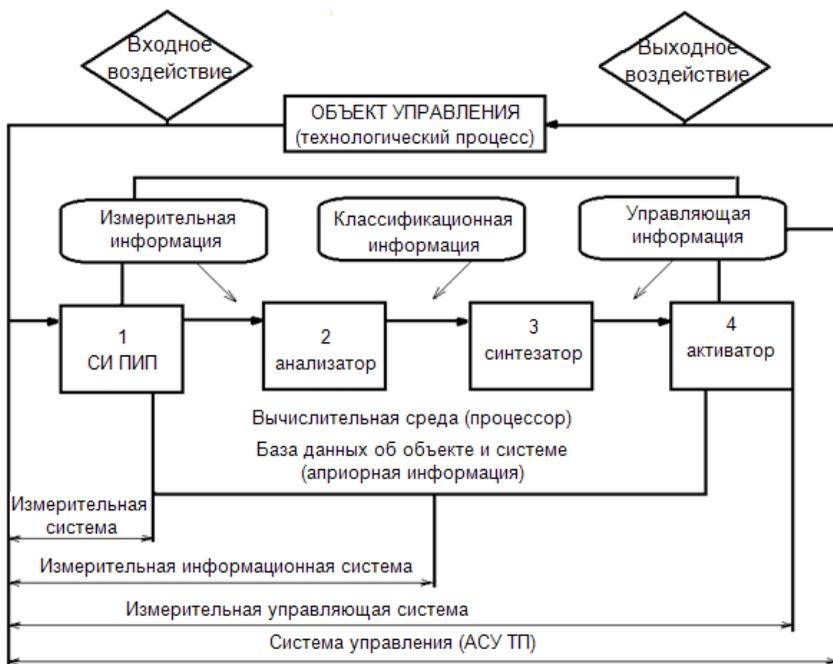


Рис. 4.1. Упрощенная структура ИИС:

- 1 – измерительная подсистема; 2 – классификационная подсистема;  
 3 – управляющая подсистема; 4 – исполнительная подсистема;  
 ПИП – первичный измерительный преобразователь

Часть ИИС после линий связи, соединяющих ее с первичными преобразователями, обычно называют измерительно-вычислительным комплексом (ИВК). Значительная часть современных ИВК строится на базе контроллеров, как правило, модульного исполнения, включающих в себя аналого-цифровые и цифроаналоговые преобразователи, процессор, модули дискретной (бинарной) информации (входные и выходные), вспомогательные устройства. Состав, конфигурация, программное обеспечение ИВК конкретизируются с учетом специфики объекта.

Сложность структуры и многоканальность ИИС приводит к тому, что государственному метрологическому контролю и надзору (ГМКН) может подлежать не вся ИИС, а только часть ее

ИК. Сложность метрологического обеспечения (МО) и ГМКН связана с наличием в структуре ряда ИИС отдельных частей, размещаемых на перемещающихся объектах. В результате одна (передающая) часть ИИС может работать с различными приемными частями в процессе одного и того же цикла измерений по мере перемещения объекта.

При выпуске и эксплуатации таких ИИС заранее неизвестны конкретные экземпляры приемной и передающей частей, которые будут работать совместно, тем самым отсутствует «стандартный» объект, для которого регламентируются МХ. Контроль и МО ИИС как целостного объекта затрудняет возможное использование первичных измерительных преобразователей, встроенных в технологическое оборудование. Широкое использование в составе ИИС вычислительной техники выдвигает проблему аттестации алгоритмов обработки результатов измерений.

Особенности ИИС делают особенно актуальной для них проблему расчета МХ ИИС по МХ образующих их компонентов. Метод расчета МХ ИК ИИС существенно зависит от того, относятся ли образующие его СИ к линейным устройствам. Методы расчета нелинейных систем зависят от вида нелинейности, возможности расчленения СИ на линейную инерционную и нелинейную безынерционную часть и от других обстоятельств и отличаются большим разнообразием.

Основными признаками ИИС являются: область применения; способ комплектования; структура, виды входных сигналов; виды измерений; режим работы, функциональные свойства компонентов.

*По области применения ИИС делят на группы:*

- для научных исследований;
- для испытаний и контроля сложных изделий;
- для управления технологическими процессами.

*По способу комплектования:*

- агрегатированные;
- неагрегатированные, состоящие из компонентов, специально разработанных для конкретных систем.

Агрегатированные ИИС, как правило, включают универсальное ядро – ИВК (измерительно-вычислительный комплекс), на основе которого, используя датчики различных физических величин, можно строить ИИС различного назначения.

*По структурным признакам:*

– системы параллельно-последовательной структуры. Основным признаком такой структуры служит наличие ИК, циклически коммутируемого с множеством датчиков;

– системы параллельной структуры, включающие множество одновременно работающих каналов, выходные системы которых преобразуются функциональным единым преобразователем и обрабатываются в одном вычислительном устройстве.

Сигналы на входе ИИС могут быть непрерывными или дискретными, детерминированными или случайными.

В зависимости от соотношения между скоростью изменения входных сигналов и инерционными свойствами системы различают два основных режима работы ИИС: статический и динамический. В динамическом режиме инерционные свойства системы оказывают влияние на результат измерения.

Под компонентом ИИС понимают входящие в состав ИИС технические устройства, выполняющие одну из функций, предусматриваемых процессом измерений и преобразования измерительной информации в другие виды информации. В соответствии с функциями, компоненты подразделяют на измерительные, связующие, вычислительные и информационные.

Измерительный компонент ИИС – средство измерений: измерительный прибор, измерительный преобразователь, мера, измерительный коммутатор.

Измерительные компоненты по характеру функциональных преобразований подразделяются на аналого-цифровые и цифро-аналоговые.

Аналоговые измерительные компоненты могут быть линейными и нелинейными, аналого-цифровые по своей природе являются нелинейными устройствами.

Связующий компонент ИИС – техническое устройство либо часть окружающей среды, предназначенный или используемый для передачи с минимально возможными искажениями сигналов, несущих информацию об измеряемой величине, от одного компонента ИИС к другому.

Вычислительный компонент ИИС – цифровое вычислительное устройство (или его часть) совместно с программным обеспечением, выполняющее функцию обработки (вычисления) результатов наблюдений для получения расчетным путем результатов измерений, выражаемых числом или соответствующим кодом.

Вычислительные компоненты подразделяются на:

- аналогово-вычислительные – аналоговые устройства, выходной сигнал которых является функцией двух или более сигналов;

- цифровые вычислительные – устройства, выходной цифровой сигнал которых является функцией двух или более сигналов.

Информационный компонент ИИС – техническое средство, предназначенное для получения, хранения, преобразования и передачи информации.

С точки зрения информационной теории измерительных устройств процесс измерения, выполняемый любым измерительным устройством (включая необходимые действия человека-оператора), состоит из ряда последовательных преобразований информации об измеряемой величине, проводимых до тех пор, пока она не будет представлена в том виде, ради получения которого и выполняется данное измерение. СИ рассматривается как канал приема (получения) и передачи информации (измерительной).

Таким образом, СИ и измерительный компонент ИИС являются разновидностью информационного компонента.

Поэтому, несмотря на универсальность уже традиционного представления об организации информационно-измерительных систем (ИИС) как базового в структуре любой системы управления, следует, употребляя понятие «измерительная информационная система (ИИС)», несмотря на всю схожесть аббревиатур, понимать

различие в сущности организационно-технологических представлений об организации процесса управления в различных научно-технических и производственных областях.

Иными словами, употребляя понятие «информационно-измерительная система (ИИС)», мы подразумеваем то, что отражено практически во всех математических справочниках. То есть, ИИС реализует технологии обработки, измерения и анализа информации, в том числе и в гуманитарной сфере деятельности. Мы не задаемся вопросом: «Откуда же взялась эта информация?». Отсюда и все алгоритмы и программы по обработке этой информации и их нацеленность на решение задач управления связаны, преимущественно, с только результатами обработки и анализа этой информации, оценками ее достоверности и количественными характеристиками, полученными в результате обработки информации.

Когда же мы говорим об организации процесса управления в различных научно-технических и производственных областях, например, в теплоэнергетике, то в первую очередь мы задаемся вопросом: «Откуда же взялась эта информация, с помощью каких приборов она получается, как она связана с технологическими и производственными процессами?», после чего можно сосредоточиться на анализе этой информации, принять управляющее решение и осуществить управляющее воздействие. Это относится и к созданию систем управления любых научно-исследовательских процессов и производств [8].

В частности, если мы говорим о теплоэнергетике, то именно информация о характере протекания физических и технологических процессов, получаемая с помощью измерительной техники (средств и способов получения достоверной количественной информации на основе электрических измерений о температуре и давлении), является главным фактором управления.

Таким образом, назначение ИИС в теплоэнергетике можно определить как целенаправленное оптимальное ведение измерительного процесса и обеспечение смежных систем высшего уровня достоверной информацией. Исходя из этого, основные функции

ИИС таковы: получение измерительной информации от объекта исследования, ее обработка, передача, представление информации оператору и (или) ЭВМ, запоминание, отображение и формирование управляющих воздействий (см. рис. 4.1).

Степень достижения функций принято характеризовать с помощью критериев измерения. ИИС оптимизируют по многим частичным критериям, таким как точность, помехоустойчивость, надежность, пропускная способность, адаптивность, сложность, экономичность и др.

Состав и структура конкретной ИИС определяется общими техническими требованиями, установленными ГОСТом, и частными требованиями, содержащимися в техническом задании на ее создание.

ИИС должна управлять измерительным процессом или экспериментом в соответствии с принятым критерием функционирования; выполнять возложенные на нее функции в соответствии с назначением и целью; обладать требуемыми показателями и характеристиками точности, надежности и быстродействия; отвечать экономическим требованиям, предъявляемым к способам и форме представления информации, размещения технических средств; быть приспособленной к функционированию с ИИС смежных уровней иерархии, т. е. обладать свойствами технической, информационной и метрологической совместимости; допускать возможность дальнейшей модернизации и развития и др.

Упрощенная схема взаимодействия основных компонентов ИИС представлена на рис. 4.1.

Процессом функционирования ИИС (как и любой другой технической системы) является целенаправленное преобразование входной информации в выходную. Это преобразование выполняется либо автоматически комплексом технических средств (техническим обеспечением), либо совместно-оперативным персоналом и КТС в сложных ИИС, измерительно-управляющих системах. Чтобы люди и комплекс технических средств могли функционировать

оптимально, необходимы соответствующие инструкции и правила. Эту задачу выполняет организационное обеспечение.

Математическое, программное и информационное обеспечение входит в состав только ИИС с цифровым вычислительным комплексом.

- Математическое обеспечение – это модели и вычислительные алгоритмы.

- Программное обеспечение гарантирует конкретную реализацию вычислительных алгоритмов и алгоритмов функционирования системы, охватывает круг решений, связанных с разработкой и эксплуатацией программ.

- Информационное обеспечение определяет способы и конкретные формы информационного отображения состояния объекта исследования в виде документов, диаграмм, графиков, сигналов для их представления обслуживающему персоналу и ЭВМ для дальнейшего использования в управлении.

Всю систему в целом охватывает метрологическое обеспечение.

Технические средства ИИС состоят из следующих блоков:

- 1) множества первичных измерительных преобразователей (датчиков);

- 2) множества вторичных измерительных преобразователей;

- 3) множества элементов сравнения – мер;

- 4) блока цифровых устройств;

- 5) множества элементов описания – норм;

- 6) множества преобразователей сигнала, средств отображения, памяти и др.

Блоки 1 - 6 используют в цифровых ИИС; блоки 1, 2, 3 и 6 – в аналоговых ИИС.

При наличии в составе ИИС ЭВМ информация к ЭВМ может поступать непосредственно от устройств обработки и (или) хранения.

Каждому конкретному виду ИИС присущи многочисленные особенности, определяемые узким назначением систем и их техно-

логически-конструктивным исполнением. Ввиду многообразия видов ИИС до настоящего времени не существует общепринятой их классификации.

Наиболее распространенной является классификация ИИС по функциональному назначению. По этому признаку ИИС реализуются в виде:

- измерительных систем (ИС);
- систем автоматического контроля (САК);
- систем технической диагностики (СТД);
- систем распознавания образов (идентификации) (СРО);
- телеизмерительных систем (ТИС).

Собственно ИС используются для различного рода комплексных исследований научного характера. Они предназначены для работы с объектами, характеризующимися до начала эксперимента минимумом априорной информации. Цель создания таких систем заключается в получении максимального количества достоверной измерительной информации об объекте для составления алгоритмического описания его поведения.

Обратная связь системы с объектом отсутствует или носит вспомогательный характер. Информация, полученная на выходе ИС, может использоваться для принятия каких-либо решений, создания возмущающих воздействий, но не для управления объектом. ИС предназначена для создания дополнительных условий проведения эксперимента, для изучения реакции объекта на эти воздействия. Следовательно, использование информации не входит в функции ИС. Эта информация предоставляется человеку-оператору или поступает в средства автоматической обработки информации.

Для ИС характерны:

- более высокие по отношению к системам другого вида требования к метрологическим характеристикам;
- более широкий спектр измеряемых физических величин и в особенности их количество (число измерительных каналов);

- необходимость в средствах представления информации - это связано с тем, что основной массив информации с выхода систем передается человеку для принятия им решения об изменении условий проведения эксперимента, его продолжении или прекращении.

Поэтому определяющим требованием является неискаженное, наглядное и оперативное представление текущей информации с учетом динамики ее обновления и быстродействия системы, обеспечивающее удобство восприятия и анализа человеком;

- большой объем внешней памяти для систем, в которых обработка и анализ результатов измерений выполняются после завершения процесса эксперимента с помощью набора различных средств обработки и представления информации.

Классификация ИС по функциональному назначению представлена в *таблице 4.1*, где:

- «**A**» – ИС для прямых измерений, т. е. независимых измерений дискретных значений непрерывных величин;

- «**B**» – статистические ИС, предназначенные для измерения статистических характеристик измеряемых величин;

- «**B**» – системы, предназначенные для раздельного измерения зависимых величин.

Наиболее распространены системы для прямых измерений. Входными в ИС для прямых измерений являются величины, воспринимаемые датчиками или другими входными устройствами системы.

Задача таких ИС заключается в выполнении аналого-цифровых преобразований множества величин и выдаче полученных результатов измерения.

Таблица 4.1

**Классификация измерительных систем (ИС)  
по функциональному назначению**

«А» ИС для прямых измерений	«Б» Статистические ИС	«В» Раздельное измерение зависимых величин
Многоканальные ИС	ИС для измерения параметров распределения случайных процессов	Многомерные ИС
Мультиплицированные ИС	Аппроксимирующие ИС	Сканирующие ИС
Корреляционные ИС	Многоточечные ИС	Системы спектрального анализа

В рассматриваемых ИС основные типы измеряемых входных величин могут быть сведены либо к множеству изменяющихся во времени  $t$  величин  $\{x_i(t)\}$ ,  $i=1,2,\dots,n$ , либо к изменяющейся во времени и распределенной по пространству  $S$  непрерывной функции  $x(t,S)$ . При измерении непрерывная функция  $x(t,S)$  представляется множеством дискрет  $x(t_i, S_j)$ ,  $i=1,2,\dots,n$ ,  $j=1,2,3$ .

Измерительные системы, производящие измерения дискрет функции  $x(t,S)$ , основаны на использовании многоканальных, многоточечных, мультиплицированных и сканирующих структур.

Многоканальные системы параллельного действия объединяются в один из самых распространенных классов измерительных систем параллельного действия, применяемых во всех отраслях народного хозяйства. Основные причины столь широкого распространения многоканальных ИС заключаются в возможности использования стандартных, относительно простых измерительных приборов, в наиболее высокой схемной надежности таких систем, в возможности получения наибольшего быстродействия при одно-

временном получении результатов измерения, в возможности индивидуального подбора СИ к измеряемым величинам.

Недостатки таких систем – сложность и большая стоимость по сравнению с другими системами.

Мультиплицированные (с общей образцовой величиной) ИС имеют меньшее число элементов, чем многоканальные параллельные ИС, но несколько меньшее быстродействие. В этих системах измерительная величина сравнивается с линейно изменяющейся величиной. При фиксированных моментах начала развертки и равенстве  $x$  и  $x_k$  может быть определен интервал времени  $t_x$ , пропорциональный значению  $x_k$ . В многоканальной системе возникают трудности в разделении сигналов от элементов сравнения. В этом случае прибегают к специальным мерам.

В сканирующих ИС (ИС последовательного действия) операции получения информации выполняются последовательно во времени с помощью одного канала измерения. Если измеряемая величина распределена в пространстве или собственно координаты точки являются объектом измерения, то восприятие информации в таких системах выполняется с помощью одного сканирующего датчика. Сканирующие системы находят применение при расшифровке графиков в медицине, геофизике, метрологии, при промышленных испытаниях, во многих отраслях народного хозяйства и при научных исследованиях затрачивается значительное время на измерение параметров графических изображений и представление результатов измерения в цифровом виде. Сканирование может выполняться непосредственно воспринимающим элементом или сканирующим лучом при неподвижном воспринимающем элементе. Такими элементами могут быть оптико-механические или электронно-развертывающие устройства. Недостаток систем – малое быстродействие.

Многоточечные ИС (ИС последовательно-параллельного действия) применяют в сложных объектах с большим числом измеряемых параметров. В этих системах при множестве датчиков имеется всего один измерительный тракт и измерительный коммутатор. Не-

достаток систем – пониженные быстродействие и точность за счет использования ключей коммутаторов.

По характеру взаимодействия системы с объектом исследования и обмена информацией между ними ИИС могут быть разделены на активные и пассивные.

Пассивные системы только воспринимают информацию от объекта, а активные, действуя на объект через устройство внешних воздействий, позволяют автоматически и наиболее полно за короткое время изучить его поведение. Такие структуры широко применяются при автоматизации научных исследований различных объектов.

В зависимости от характера обмена информацией между объектами и активными ИИС различают ИС без обратной связи и с обратной связью по воздействию. Воздействие на объект может осуществляться по заранее установленной жесткой программе либо по программе, учитывающей реакцию объекта. В первом случае реакция объекта не влияет на характер воздействия, а следовательно, и на ход эксперимента. Его результаты могут быть выданы оператору после окончания. Во втором случае результаты реакции отражаются на характере воздействия, поэтому обработка ведется в реальном времени. Такие системы должны иметь развитую вычислительную сеть. Кроме того, необходимо оперативное представление информации оператору в форме, удобной для восприятия, чтобы он мог вмешиваться в ход процесса.

Эффективность научных исследований, испытательных, поверочных работ, организации управления технологическими процессами с применением ИИС в значительной мере определяется методами обработки измерительной информации.

Операции обработки измерительной информации выполняются в устройствах, в качестве которых используются специализированные либо универсальные ЭВМ. В некоторых случаях функции обработки результатов измерения могут осуществляться непосредственно в измерительном тракте, т. е. измерительными устройствами в реальном масштабе времени.

В системах, которые содержат вычислительные устройства, обработка информации может производиться как в реальном масштабе времени, так и с предварительным накоплением информации в памяти ЭВМ, т. е. со сдвигом по времени.

При исследовании сложных объектов или выполнении многофакторных экспериментов применяются измерительные системы, сочетающие высокое быстродействие с точностью. Такие ИИС характеризуются большими потоками информации на их выходе. Значительно повысить эффективность ИИС при недостаточной априорной информации об объекте исследования можно за счет сокращения избыточности информации, т. е. сокращения интенсивности потоков измерительной информации. Исключение избыточной информации, несущественной с точки зрения ее потребителя, позволяет уменьшить емкость устройств памяти, загрузку устройств обработки данных, а следовательно, и время обработки информации, что снижает требования к пропускной способности каналов связи.

При проектировании и создании ИИС большое внимание уделяется проблеме повышения достоверности выходной информации и снижения вероятностей возникновения (или даже исключения) нежелательных ситуаций. Этого можно достичь, если на ИИС возложить функции самоконтроля, в результате чего ИИС способна осуществлять тестовые проверки работоспособности средств системы и тем самым сохранять метрологические характеристики тракта прохождения входных сигналов, проверять достоверность результатов обработки информации, получаемой посредством измерительных преобразований, и ее представления.

Все более широкое развитие получают системы, предусматривающие автоматическую коррекцию своих характеристик – самонастраивающиеся (самокорректирующиеся) системы.

Введение в такие системы свойств автоматического использования результатов самоконтроля – активного изучения состояния ИИС, и приспособляемое к изменению характеристик измеряемых сигналов или к изменению условий эксплуатации делает возможным обеспечение заданных параметров системы.

### § 4.3. Современные измерительно-вычислительные комплексы средств автоматизации производственных предприятий

Задачи автоматизации управления на современных предприятиях решаются с широким применением персональных компьютеров (ПК), а подключение ПК к локальным сетям в качестве внутрипроизводственной коммуникационной системы создает дополнительные преимущества, что позволяет рассматривать проблему сбора и обработки данных как отдельную подсистему *компьютеризованного интегрированного производства (computer integrated manufacturing – CIM)* [11].

Применение информационно-измерительных систем и другой информационной техники в управлении различными процессами (например, проектировании, объемном моделировании, конструировании, обработке, сборке и т. п.) приводит к созданию так называемых *компьютеризованных систем* (английская аббревиатура – *CAx*, где *CA* означает «*computer aided*», то есть «дополненное компьютером», а «*x*» – соответствующее поле деятельности).

Известны следующие компьютеризованные системы:

- *CAD* – компьютеризованное проектирование и конструирование (*D = design*), например, создание и манипулирование 3-х мерными объектами на экране;

- *SAM* – компьютеризованное управление транспортным, складским и производственным оборудованием (*M = manufacturing*), например, управление гибкими производственными системами;

- *CAE* – компьютеризованная инженерная деятельность, особенно при проектировании изделий (*E = engineering*), например, выполнение анализа схем с использованием специальных пакетов программ;

- *CAP* – компьютеризованное планирование (*P = planning*), например, программирование станков;

- *CAQ* – компьютеризированное обеспечение качества (*Q = quality assurance*), например, автоматизированный контроль при серийном производстве изделий, включая и обработку результатов.

Наряду с техническими заданиями на предприятии могут выполняться с помощью компьютеров и планово-экономические задачи. Для этих целей применяются *программные системы производственного планирования и управления* (английская аббревиатура *PPS*).

Целью *CIM* является соединение на основе использования возможностей информационных технологий всех производственных процессов, начиная с проектирования изделия, до его изготовления и сбыта, т. е. интеграция потоков данных и производственных потоков. Например, на начальном этапе развития технологии быстрого прототипирования и системы автоматизированного проектирования развивались независимо друг от друга.

Повышение эффективности новых технологий, снижение себестоимости и времени получения прототипов непосредственно по компьютерным моделям невозможно, если не приложить усилия для разработки набора стандартов передачи данных из *CAD/CAM/CAE* систем в *системы быстрого прототипирования*, создания эффективных алгоритмов обработки и преобразования *CAD*-моделей в этих *системах* с целью получения необходимых управляющих программ для исполнительных механизмов.

Объективные оценки возможностей различных технологий быстрого прототипирования и решение проблем их интеграции с *CAD/CAM/CAE*-системами были реализованы в рамках проекта под названием *CARP – Computer Aided Rapid Prototyping* программы «ЭВРИКА», профинансированной ЕС в середине 90-х годов.

Для *CIM* показательно то, что данные, генерируемые на одном участке производства, используются и на всех других участках. Таким образом, отпадает необходимость в многократном получении одних и тех же данных, устраняются узкие места и сокращается время прохождения информационных потоков. В организованном

по концепции *CIM* производстве все начинается с проектирования изделия и заканчивается его изготовлением без промежуточного вмешательства в автоматизированный производственный процесс. Планирование производства и само производство образуют здесь управляющие кибернетические системы и при необходимости быстро модифицируются. Это касается и систем обеспечения качества – одного из компонентов *CIM*.

Вместе с тем ясно, что возможность реализации «безлюдных производств» на практике еще далеко не очевидна, так как пока еще не созданы *все* технические предпосылки для сведения воедино отдельных подсистем, например *CAD* и *CAM*.

Есть трудности и в области совместимости аппаратурных и программных средств. Проблема совместимости, важнейшая проблема для будущего *CIM*, нашла отражение в стремлении к стандартизации на международном уровне. Речь идет о протоколах *MAP* (manufacturing automation protocols) фирмы «GENERAL MOTORS», способствующих унификации архитектуры коммуникационных систем в области производства и позволяющих создать информационную сеть между различными предприятиями [12-18].

По мнению специалистов, *CIM* будет одной из ведущих тем в XXI веке, и многие крупные предприятия уже готовы к тому, чтобы сделать первые шаги в направлении создания *CIM* посредством объединения отдельных частей *CAx*.

Трудности внедрения *CIM* объясняются не только указанными проблемами в области создания и совместимости аппаратурных и программных средств. Переход к *CIM* связан с очень большими затратами, и поэтому большинство автоматизированных работ в промышленности до настоящего времени осуществляется станками и машинами с числовым программным управлением (ЧПУ) и роботами, сконструированными для выполнения строго заданных функций в производственном процессе. Несмотря на то, что управление ими осуществляется с помощью ЭВМ, такие машины, по сути, представляют собой простые позиционные механизмы, дороги и не обладают гибкостью.

Прогресс в области электронной обработки данных дал толчок развитию измерительной техники. Измерения, проводившиеся до недавнего времени «вручную», проводятся сейчас с помощью компьютеров (интегрированные в систему управления производством измерительные системы), а операторы наблюдают за работой контрольных автоматов и за результатами, получаемыми на электронно-вычислительных установках. Примерами современных измерительных информационных устройств, управляемых компьютерными программами и используемых для оснащения подсистем компьютеризованного интегрированного производства, являются: измерительные приборы для контроля размеров изделий; испытательные установки для анализа поведения образцов под влиянием сжатия, изгиба, растяжения; системы технического зрения для измерения или счета двумерных объектов; системы с токовихревыми преобразователями для контроля твердости и структурных свойств поверхностей изделий; пирометрические устройства для бесконтактного измерения температуры и т. д.

В машиностроении прослеживается тенденция оснащения технологического оборудования все более мощным набором информационных устройств – сенсоров, устройств обработки информации и принятия решений, реализованных в виде аппаратных и программных комплексов, обеспечивающих выполнение работ в условиях недетерминированного характера рабочей обстановки. В начале 60-х годов стало очевидным, что эффективность решения задач автоматизации производства может быть существенно повышена за счет использования промышленных роботов (ПР), оснащенных тактильными средствами осязания. К концу 60-х в Америке, Японии, Великобритании, Германии, Франции, СССР и других развитых странах на основе ЭВМ создают системы для манипуляции с объектами, оснащенные техническим зрением. В течение 70-х и последующие годы ученые и инженеры активно работают над проблемами эффективности использования датчиков внешней обстановки и развития технологии осязания для повышения качества функционирования РТС. Развитие средств и тех-

нологии очувствления позволяет наделить технологическое оборудование элементами интеллекта и является наиболее перспективным направлением автоматизации производств, и искусственному зрению при этом принадлежит главная роль в дальнейшем совершенствовании средств управления процессами.

Основные области автоматизации управления производством в машиностроении следующие: обслуживание кузнечно-прессового оборудования – 25 %; обслуживание металлорежущих станков – 20 %; окраска и нанесение защитных покрытий – 13 %; сварка – 11 %; транспортные и складские работы – 10 %; обслуживание печей и нагревательных устройств – 8 %; сборка – 3 %; прочие работы – 10 %.

Трудность создания комплексно-автоматизированных производств в машиностроении связана с большим числом переходов и операций, разнообразием инструмента, сложным характером обработки на различных станках и необходимостью частой переналадки оборудования. Оптимальные варианты изготовления разных деталей существенно различаются, что затрудняет типизацию технологических процессов и выбор средств автоматизации с охватом широкой номенклатуры деталей. Вместе с тем, главными направлениями автоматизации производства являются:

- внедрение роторных, роторно-конвейерных линий, станков с ЧПУ и создание на их основе автоматизированных систем управления технологическими процессами с использованием ПР для автоматизации вспомогательных операций;

- оснащение универсальных станков автоматическими зажимными, автоматическими загрузочными, контрольно-измерительными и прочими устройствами с применением ПР на базе групповых методов обработки;

- организация для определенных групп деталей поточных линий с транспортными ПР, работающими по замкнутому циклу обработки;

– разработка и внедрение специальных станков и механизмов, заменяющих ручной труд на всех операциях основного производства;

– механизация и автоматизация вспомогательного производства (складирование, уборка и выдача полуфабриката и инструмента, транспортировка, учет и складирование готовых деталей).

Создание ИСУ автоматизированного производства начинается с выбора технологий и состава технологического оборудования для обработки, сборки, контроля, транспортировки, складирования, контроля и управления. После этого приступают к разработке функциональной, технологической и информационной структуры, вычислительной сети, распределению решаемых задач по уровням сети.

Следующий этап – создание кибернетической системы, выполняющей функции автоматизации управления производственными и контрольно-измерительными автоматами, то есть технологическим оборудованием, робототехническими комплексами, манипуляторами, оптико-электронными измерительными системами и системами технического контроля, манипуляторами и т. д.

Дальше следует разработка алгоритмического и программного обеспечения с учетом взаимодействия системы управления автоматизированным производством с другими подсистемами предприятия, а именно: с *автоматизированной системой управления предприятием (АСУП)*, *системой автоматизированного проектирования (САПР)*, *автоматизированной системой технологической подготовки производства (АСТПП)* и непосредственно с производством. Каждая конкретная производственная задача определяет вид технологического оборудования и номенклатуру инструментальных средств автоматизации, сложность программного обеспечения.

На этапе формирования подсистемы *компьютеризованного управления качеством (САК)* в рамках *СИМ*, создание автоматизированной интегральной информационной системы управления предприятием завершается.

Структуру компьютеризованного производства можно представить как состоящую из проектно-конструкторского, технологического и контролирующего модулей, оснащенных ПР и соответствующими инструментальными и информационными средствами автоматизации; вычислительных средств (сетей ЭВМ и программного обеспечения всех уровней); автоматизированной подсистемы контроля и анализа работы АП, принятия и реализации решений. В последнюю подсистему входят и средства контроля состояния основных модулей АП, датчики состояния оснастки, инструмента, информационные средства автоматизации (то, что принято называть средствами осязания), включая и разнообразные средства технического контроля на базе СТЗ, обеспечивающие решение разнообразных задач автоматизации как основного, так и вспомогательных производств.

Существуют различные способы построения автоматизированных производств, но только использование измерительных информационных систем и технологий делает реальным переход к *СИМ* (то есть к полностью автоматизированному производству, управляемому с помощью ЭВМ, или к так называемым «безлюдным» технологиям и производствам). В таких системах адаптивные и интеллектуальные роботы обеспечивают активное и целенаправленное взаимодействие с реальной внешней средой на основе информации о ее состоянии, о состоянии и функционировании исполнительных механизмов. При этом управляющая программа роботов не содержит полного набора необходимой информации, но недостающая ее часть формируется в процессе функционирования робота на основе анализа выполняемых действий и обработки данных о параметрах внешней среды, получаемых средствами осязания и средствами технического контроля (ТК) технологических процессов, что обеспечивает возможность приспособления робота к изменяющимся производственным условиям.

Средства осязания роботов, средства измерений и технического контроля являются, безусловно, необходимой частью технологического оборудования, и только с их помощью обеспечива-

ется возможность функционирования робототехнических систем в условиях частично упорядоченной среды на производстве, а также решаются задачи автоматизации контроля продукции и диагностики всего производственного комплекса. Указанные устройства могут использовать сенсорную информацию различной природы (в том числе зрительную, силомоментную, тактильную), по уровню сложности и организации представляют собой контрольно-измерительные машины, управляемые ЭВМ, и могут быть выделены в отдельную группу средств автоматизации.

#### **§ 4.4. Основные правила составления функциональных схем автоматизации в теплоэнергетике**

При разработке проектов автоматизации теплоэнергетических установок решаются вопросы объема оснащения технологического оборудования средствами регулирования, управления и контрольно-измерительными приборами, выбора схем автоматического регулирования, сигнализации и защиты.

Выбор количества параметров, подлежащих регулированию, объема информации о ходе процесса и состоянии агрегата диктуется технологической необходимостью. Контролю подлежат лишь те величины, которые подвержены изменению по ходу процесса и управляемы.

##### **4.4.1. Основные понятия**

Для выполнения технического проекта автоматизации необходимо знать:

- 1) состав проектируемого объекта, работу и основные характеристики технологических установок и агрегатов;
- 2) требования к структуре управления объектом, пункты управления (центральные щиты управления, диспетчерские щиты управления, агрегатные щиты управления и др.), их расположение и взаимосвязь;

3) перечень контролируемых и регулируемых величин, характеристики измеряемых сред (агрессивная или нет, давление, температура и т. д.), требуемую точность контроля и регулирования (допустимые пределы отклонения регулируемой величины), функциональные признаки приборов (показание, регистрация, сигнализация, суммирование и т. д.);

4) перечень дистанционно управляемого силового оборудования и электроприводов;

5) необходимый минимум защит и сигнализации при работе объекта.

Функциональная схема является основным техническим документом, определяющим структуру и характер систем автоматизации технологических процессов, а также оснащение их приборами и средствами автоматизации (в том числе средствами вычислительной техники).

Функциональная схема должна учитывать:

1) состав и содержание задач по контролю и управлению технологическими процессами;

2) взаимосвязь между местными системами управления отдельными объектами и центральной системой управления, если она определена структурой управления.

На функциональной схеме показывают:

1) упрощенную технологическую схему агрегатов, подлежащих автоматизации, с указанием всех потоков, регулирующих органов и того оборудования, которое необходимо для понимания работы агрегата;

2) приборы и средства автоматизации и управления, изображаемые условными обозначениями, которые приняты по ГОСТ 21.404–85, а также линии связи между ними;

3) агрегатированные комплексы, машины централизованного контроля, управляющие вычислительные машины, микропроцессорные средства управления и линии связи их с датчиками, преобразователями, исполнительными механизмами и т. п.

Функциональные схемы являются основанием для составления заказных спецификаций на приборы и средства автоматизации, схемы кабельных и трубных проводок, схемы электропитания щитов КИПиА и т. п.

#### **4.4.2. Порядок составления функциональных схем в теплоэнергетике**

Прежде чем составлять функциональную схему автоматизации того или иного агрегата (установки), необходимо уяснить технологические процессы, протекающие в нем, определиться с необходимыми уровнями автоматизации (контроль параметров, необходимые защиты и сигнализация, автоматическое регулирование параметров и т. п.), со структурой автоматизации (приборы местные, щит агрегата, пульт управления, машины централизованного контроля и управления и т. п.). Только после этого приступить к составлению функциональных схем.

Порядок составления схем следующий:

1) В верхней части листа изображают упрощенную технологическую схему оборудования.

2) В нижней части листа по всей длине формата рисуют прямоугольники, число которых отражает принятую структуру средств автоматизации.

3) В прямоугольниках располагают условные изображения приборов контроля и средств автоматизации согласно принятой структуре.

4) Составляют функциональную схему автоматизации, пользуясь следующими правилами: комплекты измерительных и регулирующих приборов начинают рисовать слева направо и сверху вниз, т. е. на технологической схеме у трубопроводов и оборудования размещают условные изображения первичных преобразователей; промежуточные преобразователи (датчики) размещают в первом (верхнем) прямоугольнике (приборы местные), вторичные измерительные приборы размещают во втором (сверху) прямоугольнике (щит агрегата) и т. д.

5) Все приборы, входящие в измерительный или регулирующий комплект, соединяют линиями связи. Если приборов много и получается много пересекающихся линий связи, затемняющих схему, допускается разрыв линий связи. Разрыв производится при подводе линий связи к приборам, расположенным в первом прямоугольнике (приборы местные), и нумеруется арабскими цифрами (1, 2, 3, ...) слева направо (см. примеры построения схем, приведенные в приложении).

6) После составления функциональной схемы автоматизации все измерительные и регулирующие (управляющие) комплекты и все приборы, входящие в комплект, нумеруются слева направо. Нумерация приборов своя у каждой организации, выполняющей проект автоматизации.

7) После составления функциональной схемы и нумерации приборов составляют заказную спецификацию на приборы и средства автоматизации.

На технологических трубопроводах показывают только те вентили, задвижки, заслонки, клапаны и другие устройства, которые участвуют в системе контроля и управления процессами или необходимы для определения относительного расположения отборных устройств и первичных измерительных преобразователей.

#### **4.4.3. Условное обозначение приборов и средств автоматизации в теплоэнергетике**

На функциональной схеме изображаются все приборы, средства автоматизации и управления, необходимые для оснащения проектируемого объекта.

К приборам и средствам автоматизации относится группа устройств, с помощью которых осуществляется измерение, регулирование, управление и сигнализация технологических процессов различных производств. Приборы и средства автоматизации подразделяют на измерительные и преобразующие приборы, исполнительные механизмы и регулирующие органы. Для понимания

и прочтения условных обозначений всех этих устройств необходимо знать их принцип действия и назначение.

Измерительное устройство (комплект измерения какого-либо параметра) в общем случае состоит из первичного, промежуточного преобразователя и измерительного прибора (вторичный измерительный или регулирующий прибор).

Первичный измерительный преобразователь – это элемент измерительного устройства, к которому подведена измеряемая величина (параметр). Он занимает первое место в измерительной цепи (канале измерения). Примерами первичных преобразователей могут служить сужающее устройство для измерения расхода среды (диафрагма), уравнительный сосуд для измерения уровня жидкости, термоэлектрические преобразователи (термопары, термометры сопротивления) и т. д.

Промежуточный преобразователь (датчик) – это элемент измерительного устройства, состоящий из чувствительного элемента и преобразователя сигнала от чувствительного элемента в сигналы различного вида (электрические, пневматические) для дистанционной передачи показаний на вторичные приборы (измерительные или регулирующие). Примером такого преобразователя могут служить манометры (чувствительный элемент - одновитковая трубчатая пружина, преобразователь дифференциально-трансформаторный), дифманометры (чувствительный элемент – мембранный блок, преобразователь дифференциально-трансформаторный), передающие сигналы на вторичные измерительные и регулирующие приборы.

Измерительным прибором называют средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия персоналом (вторичные измерительные приборы) или для преобразования поступившего сигнала в целях регулирования (регулирующие приборы), защиты и сигнализации.

Вторичные измерительные приборы могут иметь различные функциональные отличия (признаки). Они могут быть показываю-

щими (имеют шкалу и стрелку), регистрирующими (запись на дисковую или ленточную диаграмму), интегрирующими (имеют встроенный счетчик количества протекающей среды), сигнализирующими (имеют встроенные контакты, срабатывающие при достижении измеряемого параметра максимального и минимального значений), регулируемыми (используемые при создании систем регулирования различных параметров).

Условные обозначения приборов и преобразующих устройств состоят из основного условного изображения прибора или устройства, куда вписываются буквенные обозначения контролируемых и регулируемых величин, а также функциональных признаков прибора.

Регулирующие органы по конструкции представляют собой устройства, монтируемые непосредственно в технологические линии: различные клапаны, заслонки, шиберы, направляющие аппараты и т. п.

Исполнительные механизмы предназначены для управления регулирующими органами и представляют собой относительно сложные многоэлементные устройства (двигатель, редуктор, конечные выключатели, датчики перемещения и т. п.). Они отличаются друг от друга принципом действия, техническими и эксплуатационными характеристиками и т. п. По роду используемой энергии используемые механизмы подразделяются на гидравлические, электрические и комбинированные. Несмотря на это, они в ГОСТе обозначаются одними условными изображениями.

В основу условных обозначений положены простые условные изображения приборов и буквенные обозначения параметров и функциональных признаков приборов по ГОСТ 21.404–85.

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

## ЛИТЕРАТУРА ОСНОВНАЯ

### Список первоисточников к ГЛАВЕ 1

1. Нормативные документы в области метрологии (действующие в России по состоянию на 1 января 1998 г.) : указатель // Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы (ВНИИМС). – Москва : ТОО «ТОТ», 1998.

2. Селиванов, М. Н. Качество измерений: метролог. справ. кн. / М. Н. Селиванов, А. Э. Фридман, Ж. Ф. Кудряшова. – Ленинград : Лениздат, 1987.

3. Довбета, Л. И. О соотношении понятий «измерение» и «измерение физической величины» / Л. И. Довбета, В. В. Лянчев // Измерительная техника. – 1990. – №11. – С. 19-20.

4. Сергеев, А. Г. Метрология : учеб. пособие для вузов / А. Г. Сергеев, В. В. Крохин. – Москва : Логос, 2000. – 408 с.

5. Орнатский, П. П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П. П. Орнатский. – Киев: Вища школа, 1983.

6. Грановский, В. А. Методы обработки экспериментальных данных / В. А. Грановский, Т. Н. Сирая. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1990.

7. Земельман, М. А. Метрологические основы технических измерений / З. М. Аемельман. – Москва : Изд-во стандартов, 1991.

8. Кукуш, В. Д. Электрорадиоизмерения / В. Д. Кукуш. – Москва : Радио и связь, 1987.

9. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – Москва : Советское радио, 1971.

10. Баранов, Л. А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления / Л. А. Баранов. – Москва : Энергоатомиздат, 1990.

11. Гольденберг, Л. М. Цифровая обработка сигналов / Л. М. Гольденберг, Б. Д. Матюшкин, М. У. Поляк. – Москва : Радио и связь, 1990.

12. Пиотровский, Я. Теория измерений для инженеров / Я. Пиотровский. – Москва : Мир, 1989.

13. Кавалеров, Г. И. Введение в информационную теорию измерений / Г. И. Кавалеров, С. И. Мандельштам. – Москва : Энергия, 1974.

14. Пытьев, Ю. П. Математические методы интерпретации эксперимента: учеб. пособие для вузов / Ю. П. Пытьев. – Москва : Высшая школа, 1989.

15. Метрологическое обеспечение и эксплуатация измерительной техники / Г. П. Богданов, В. А. Кузнецов, М. А. Лотонов [и др.]; под ред. В. А. Кузнецова. – Москва : Радио и связь, 1990.

### **Список первоисточников к ГЛАВЕ 2**

1. Базаров, И. П. Термодинамика / И. П. Базаров. – Москва : Высшая школа, 1991, – 376 с.

2. Раннев, Г. Г. Методы и средства измерений : учеб. для вузов / Г. Г. Раннев. – Москва : Академия, 2003.

3. Гордов, А. Н. Основы температурных измерений / А. Н. Гордов, О. М. Жагулло, А. Г. Иванова. – Москва : Энергоатомиздат, 1992.

4. Температурные измерения : справочник / О. А. Геращенко, А. Н. Гордов [и др.] ; отв. ред. О. А. Геращенко. – Киев : Наукова думка, 1989.

5. Бриндли, К. Измерительные преобразователи : справ. пособие / К. Бриндли. – Москва : Энергоатомиздат, 1991.

6. Температурные измерения : справочник / О. А. Геращенко, А. Н. Гордов, А. К. Еремина [и др.]. – Киев : Наукова Думка, 1989.

7. Гарсия, В. Измерение температуры: теория и практика / В. Гарсия // Современные технологии автоматизации. – 1999.– № 1.

8. Преображенский, В. П. Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенский. – Москва : Энергия, 1978.

9. Олейник, Б. М. Приборы и методы температурных измерений / Б. М. Олейник. – Москва : Издательство стандартов, 1987.

10. Сологубов, А. Выбор термопары, построение ее характеристик и расчет нормирующего преобразователя / А. Сологубов // Компоненты и технологии. – 2017. – № 10.

11. Белевцев, А. Термоэлектрические преобразователи температуры. Теория, практика, развитие. / А. Белевцев // Современные технологии автоматизации. – 2004. – №2.

12. ГОСТ Р 8.585-2001. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. – Москва: Госстандарт России, 2001.

13. Физика. Большой энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. – 4-е изд. – Москва : Большая Российская энциклопедия, 1998.

14. Гуртовцев, А. Измерение давления в автоматизированных системах / А. Гуртовцев // Современные технологии автоматизации. – 2001. – №4.

15. Рогельберг, И. Л. Сплавы для термопар : справочник / И. Л. Рогельберг, В. М. Бейлин. – Москва : Металлургия, 1983.

16. ГОСТ Р 50353-92 (МЭК 751-85) Термопреобразователи сопротивления. Общие технические условия = Resistive temperature transducers. General specifications : гос. стандарт Российской Федерации / Госстандарт России. – Москва, 1993.

17. ГОСТ 6651-2009. ГСИ. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний.

18. Измерения в промышленности : справ. изд. в 3х кн. Кн. 2. Способы измерения и аппаратура : пер. с нем. / под ред. П. Профоса. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Металлургия, 1990.

19. Карпов, В. А. Росточкина О. М. Чувствительность и погрешность мостовой схемы с одним измерительным элементом / В. А. Карпов, О. М. Росточкина // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. 2011.

20. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники. Линейные электрические цепи : учеб. для вузов. Ч. 1. / Г. И. Атабеков. – Москва : Энергия, 1978.

21. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 4. Контроль излучениями : практ. пособие / Б. Н. Епифанцев, Е. А. Гусев, В. И. Матвеев, Ф. Р. Соснин ; под ред. В. В. Сухорукова. – Москва : Высшая школа, 1992. – 321 с.

22. Гордов, А. Н. Основы пирометрии / А. Н. Гордов. – Москва : Металлургия, 1971.

23. Поскачей, А. А. Оптико-электронные системы измерения температуры / А. А. Поскачей, Е. П. Чубаров. – 2-е изд., перераб. И доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 246, [1] с.

24. Бармин, А. В. Радарные системы контроля уровня / А. В. Бармин // Современные технологии автоматизации. – 2002. – №4.

25. Методы и приборы для измерения давления: учебно-метод. пособие для студентов специальности 1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта» / В. В. Кулебякин. – Минск : БНТУ, 2015. – 36 с.

26. ГОСТ 8.271-77. Средства измерений давления. Термины и определения : межгос. стандарт. – Москва : Изд-во Стандартов, 1977.

27. Хансуваров, К. И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара / К. И. Хансуваров, В. Г. Цейтлин. – Москва : Издательство стандартов, 1990

28. ГОСТ 2405-88. Манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напорометры, тягомеры и тягонапорометры. Общие технические условия.

29. ГОСТ 22520-85. Датчики давления, разрежения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. Общие технические условия.

30. Pressure sensors: The design engineer's guide. – URL: <https://www.avnet.com/wps/portal/abacus/solutions/technologies/sensors/pressure-sensors/>.

31. Яковлев, В. Структура измерительной системы на базе пассивных датчиков / В. Яковлев // Современные технологии автоматизации. – 2002. – №1.

32. Баранов, И. Н. Создание полупроводниковых датчиков давлений на основе структуры «кремний на диэлектрике» / И. Н. Баранов // Автоматизация и управление в технических системах, 2005. – Вып. 24.

33. Технические измерения и приборы. Ч. 1. Измерение теплоэнергетических параметров : учеб. пособие для студентов дневной и заочной формы обучения специальности 220301 «Автоматизация технологических процессов и производств» / Н. В. Чистофорова, А. Г. Колмогоров. – Ангарск : АГТА, 2008. – 200 с.

34. Всемирный справочник по расходомерам : справ. пособие / под. ред. Й. Йодер. – Уейкфилд : Массачусетс «Флоу Рисерч Инк».

35. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества : справочник. Кн.1. – 5-е изд., перераб. и доп. / П. П. Кремлевский. – Санкт-Петербург : Политехника, 2002.

36. Каратаев, Р. Н. Расходомеры постоянного перепада давления / Р. Н. Каратаев, М. А. Копырин. – Москва : Машиностроение, 1980.

37. Кулаков, М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств : учебник / М. В. Кулаков. – 4-е изд., стер.– Москва : Альянс, 2008.

38. ГОСТ 2939-63. Газы. Условия для определения объема.

39. ГОСТ 15528-86. Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения.

40. ГОСТ 6019-83. Счетчики холодной воды крыльчатые. Общие технические условия.

41. ГОСТ 14167-83. Счетчики холодной воды турбинные. Технические условия.

42. ГОСТ 8.439-81. ГСИ. Расход воды в напорных трубопроводах. Методика выполнения измерений методом площадной скорости.

43. Киясбейли, А. Ш. Вихревые измерительные приборы / А. Киясбейли, М. Перельштейн. – Москва : Изд-во Машиностроение, 1978.

44. ГОСТ 8.586.1-2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 1. Принцип метода измерений и общие требования.

45. ГОСТ 8.586.2-2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 2. Диафрагмы. Технические требования.

46. ГОСТ 8.586.3-2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования.

47. ГОСТ 8.586.4-2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 4. Трубы Вентури. Технические требования.

48. Мейзда, Ф. Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Ф. Ф. Мейзда. – Москва : Мир, 1990. – 536 с.

49. Котур, В. И.. Электрические измерения и электроизмерительные приборы / В. И. Котур, М. А. Скомская, Н. Н. Храмова. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 400 с.

50. Электрические измерения / Л. И. Байда, Н. С. Добротворский, Е. М. Душин [и др.] ; под ред. А. В. Фремке, Е. М. Душина. – Ленинград : Энергия, 1980. – 392 с.

51. Иванова, Г. М. Теплотехнические измерения и приборы: учебник для вузов / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. – 3-е изд., – Москва : МЭИ, 2007. – 460 с.

52. Козобродов, В. А. Ультразвуковые теплосчетчики и расходомеры-счетчики, разработанные и поставляемые ЗАО «Центр-прибор» / В. А. Козобродов, М. А. Прозоров // Приборы: справочный журнал. – 1998. – № 1. – С. 14.

53. Филатов, В. И. Ультразвуковой расходомер / В. И. Филатов // Расчет и конструирование расходомеров. – Ленинград: Машиностроение, 1978. – С. 130–133.

54. Шмигара, В. Н. Ультразвуковые корреляционные и вихревые расходомеры/ В. Н. Шмигара // Приборы и системы управления. – 1995. – № 10. – С. 27

55. Савельев, И. В. Курс общей физики. Т. 1. Механика. Молекулярная физика: учебное пособие. / И. В. Савельев. – 2-е изд., перераб. – Москва: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982. – 432с.

56. Детлаф, А. А. Курс физики: учеб. пособие для втузов/ А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва: Высш. шк., 1999. – 718 с.: ил.

57. Повх, И.Л. Техническая гидромеханика / И. Л. Повх.

58. [http://zebu.uoregon.edu/~js/glossary/coriolis\\_effect.html](http://zebu.uoregon.edu/~js/glossary/coriolis_effect.html)

59. Абрамов, Г. С. Практическая расходометрия в промышленности / Г.С. Абрамов, А.В. Барычев, М.И. Зимин. – Москва: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2000. – 472 с.

60. Акчурин, Р. Р. Вихревой измеритель массового и объемного расхода на волокно оптических решетках Брега / Р. Р. Акчурин, В. А. Соловьев, А. С. Баранов // Вестник пензенского государственного университета. – 2017. – № 3 (19). – С. 76-83.

61. Алшева, К. В. Методы и особенности исследования вихревых расходомеров / К.В. Алшева // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18. – № 3.– С. 119-123 .

62. Азимов, Р. К. Тепловые преобразователи направления потока и расхода газов и жидкостей / Р. К. Азимов, Р. Азимов.– Москва : Энергоатомиздат, 1993.

63. Чистяков, В. С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям и приборам. / В. С. Чистяков. – Москва: Энергоатомиздат, 1990.

64. Фарзани, Н. Г. Технологические измерения и приборы. / Н. Г. Фарзани. – Москва: Высшая школа, 1989.

65. Шкатов, Е. Ф. Технологические измерения и КИП на предприятиях химической промышленности / Е. Ф. Шкатов. – Москва: Химия, 1986.

66. Westers, T. The door to two worlds / T. Westers. — Mannheim: Pepperl+Fuchs PA, 2001.

67. Stegmüller, W. Level Technology. Introduction to the product\_lines and their physical principles / W. Stegmüller. — Pepperl+Fuchs Kolleg GmbH, Mannheim, 1998.

68. Handbook for the training pack SENSORIC SP1. Pepperl+Fuchs Kolleg GmbH, Mannheim, 1995.

69. Бриндли, К. Измерительные преобразователи: справочное пособие: пер. с англ. / К. Бридли. — Москва: Энергоатомиздат, 1991.

70. Бармин, А. В. Радарные системы контроля уровня /А. В. Бармин. // Современные технологии автоматизации. — 2002. — №4.

71. Жданкин, В. К. Сигнализаторы изменения уровня. / В. К. Жданкин // Современные технологии автоматизации. — №2. — 2002.

### **Список первоисточников к ГЛАВЕ 3**

1. Голдобин, Ю. М. Автоматизация теплоэнергетических установок: учебное пособие / Ю. М. Голдобин, Е. Ю. Павлюк. — Екатеринбург: УрФУ, 2017.

2. Растрин, Л. А. Современные принципы управления сложными объектами / Л. А. Растрин. — Москва: Советское радио, 1980. — 233 с.

3. Андреев, С. М. Принципы построения и организации комплексов технических средств в системах автоматического управления. Курс лекций: учеб. пособие / С. М. Андреев. — Магнитогорск:Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, 2008.

4. Андреев, С. М. Разработка и моделирование несложных систем автоматизации с учетом специфики технологических процессов: учеб. пособие / С. М. Андреев, Б. Н. Парсункин. — Москва.: Академия, 2016.

5. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С. А. Чистович [и др.]. — Ленинград : Стройиздат, 1987. — 248 с.

6. Промышленные приборы и средства автоматизации: справочник / под ред. В. В. Черенкова.– Ленинград : Машиностроение, 1987.

7. Технические средства автоматизации химических производств: справ. изд. – Москва: Химия, 1991.

8. Сафиуллин, Р. К. Основы автоматики и автоматизация процессов: учеб. пособие. / Р. К. Сафиуллин. – Казань: КГАСУ, 2013. – 188 с.

9. Калмаков, А. А. Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции / А. А. Колмаков [и др.]. – Москва : Стройиздат, 1986. – 479 с.

10. Тепло и массообмен. Теплотехнический эксперимент: справочник / Е. В. Аметистов, В. А. Григорьев, Б. Т. Емцев [и др.] ; под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. – Москва: Энергоиздат, 1982 – 512 с.

11. ГОСТ 21.404–85. Условные обозначения приборов и средств автоматизации технологических процессов. – Москва : Изд-во стандартов, 1985. – [Б. п.].

12. Техника чтения схем автоматического управления и технологического контроля. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. –[Б. п.].

13. Методы и приборы для измерения давления: учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта» / В. В. Кулебякин. – Минск : БНТУ, 2015. – 36 с.

14. Хансуваров, К.И. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. / К. И. Хансуваров, В. Г. Цейтлин. – Москва: Издательство стандартов, 1990.

15. Гарсия, В. Измерение температуры: теория и практика / В. Гарсия // Современные технологии автоматизации. – 1999. – №1.

16. <http://d.17-71.com/2009/04/14/termoparyi-tipyi-i-obschee-opisanies-posobyi-podklyucheniya/>

17. Брюханов, О. Н. Газифицированные котельные агрегаты / О. Н. Брюханов, В. А. Кузнецов. – Москва : Инфра – Москва, 2010. – 391 с.

18. Кулаков, М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств: учебник / М. В. Кулаков. - 4-е изд., стер. – Москва: Альянс, 2008.
19. ГОСТ 2939-63. Газы. Условия для определения объема.
20. Плетнев, Г. П. Автоматическое регулирование и защита тепло-энергетических установок электрических станций / Г. П. Плетнев. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 368 с.
21. Плетнев, Г. П. Автоматическое управление объектами тепловых электростанций / Г. П. Плетнев. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 368 с.
22. Соколов, Б. А. Устройство и эксплуатация оборудования газомазутных котельных / Б. А. Соколов. Москва : Академия, 2007.– 302 с.
23. Клюев, А. С. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов / А. С. Клюев, А. Г. Лебедев, С. И. Новиков. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 280 с.
24. Голдобин, Ю. М.. Автоматизация теплоэнергетических установок.: учеб. пособие / Ю. М. Голдобин, Е. Ю. Павлюк. – Екатеринбург: УрФУ, 2017. - 186 с.
25. Теория автоматического управления: учебное пособие. Ч.1 / под. ред. А.А. Воронова. – Москва: Высшая школа, 1986.
26. Теория автоматического управления: учебное пособие Ч.2. / под. ред. А.А. Воронова.– Москва: Высшая школа, 1986 .
27. Кориков, А. М. Основы теории управления: учебное пособие / А. М. Кориков. – 2-е изд – Томск: НЛТ, 2002. – 392 с.
28. Андык, В. С. Лабораторный практикум по дисциплине ТАУ для студентов специальности 210200 / В. С. Андык. – Томск:Изд. ТПУ, 1998.
29. Автоматизация крупных тепловых электростанций / под редакцией М. П. Шальмана. – Москва : Энергия, 1974.
30. Плетников, С. Б. Автоматизация технологических процессов тепловых электростанций / С.Б. Плетников, Д. Б. Силюянов. – Москва : Испо – Сервис, 2001. – 156 с.

## Список первоисточников к ГЛАВЕ 4

1. Плетнев, Г. П. Автоматизированное управление объектами ТЭС: учебное пособие / Г. П. Плетнев. – Москва: Энергоиздат, 1981.
2. Плетнев, Г. П. Автоматическое управление и защита тепло-энергетических установок электростанций: учебное пособие / Г. П. Плетнев. – Москва: Энергоатомиздат, 1986.
3. Брябрин, В. М. Как устроен и работает персональный компьютер / В. М. Брябрин // Персональные компьютеры. Информатика для всех. – Москв.: Наука, 1987. – С. 15 - 59.
4. Брябрин, В. М. Профессиональные персональные ЭВМ / В. М. Брябрин // Прикладная информатика. – Москва: Финансы и статистика, 1984. – Вып. 2(7). – С. 143 - 162,
5. Дж., Кантер. Управленческие информационные системы: пер. с англ. / Катнер Дж.; под ред. А. А. Федулова и И. С. Горшкова. – Москва.: Радио и связь, 1982. – 208 с.
6. Цапенко, М. П. Измерительные информационные системы: уч. пособие для вузов / М. П. Цапенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомизд., 1985 – 357 с.
7. Громов, Г Р. Национальные информационные ресурсы: проблемы промышленной эксплуатации. / Г. Р. Громов. – Москва: Наука, 1984. – 240 с.
8. Цапенко, М. П. Измерительные информационные системы: учеб. пособие. для вузов / М. П. Цапенко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1985 – 357 с.
9. ГОСТ 27201-87. Машины вычислительные электронные персональные. Типы, основные параметры, общие технические требования.
10. Гук, М. Ю. Аппаратные средства IBM PC : энциклопедия. / М. Ю. Гук. –3-е изд. – Санкт-Петербург : Питер, 2006.
11. Goos, G. Lecture Notes in Computer Science / G. Goos, J. Hartmanis // Methods and Tools for Computer Integrated Manufacturing. Advanced CREST Course on Computer Integrated Manufacturing (CIM 83) Karlsruhe, Germany, September 5 to 16, 1983 / Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo. – 1984.

12. Промышленные приборы и средства автоматизации: справочник / под ред. В. В. Черенкова. – Ленинград: Машиностроение, 1987 г.

13. Автоматизация теплоэнергетических установок : учеб. пособие / Ю. М. Голдобин, Е. Ю. Павлюк. - Екатеринбург: УрФУ, 2017. - 186 с.

14. Автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электрической энергии (мощности). Технические требования: Приложение 11.1 к Положению о порядке получения статуса субъекта оптового рынка и ведения реестра субъектов оптового рынка.

15. ПНСТ 159-2016. Автоматизированные информационно-измерительные системы коммерческого учета электрической энергии. Общие технические условия.

16. Метрологическое обеспечение измерительных систем: уч. пособие: в 2 ч. Ч. 2. Системы учета электрической и тепловой энергии / В. А. Захаров, А. С. Волегов; [под общ. ред. В.А. Захарова]; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Ур. у-та, 2018. – 232 с.

17. ГОСТ Р 8.654-2015. ГСИ. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения.

18. ГОСТ Р 8.839-2013. ГСИ. Общие требования к измерительным приборам с программным управлением.

## **ЛИТЕРАТУРА ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ**

1. Кузнецов, В. А. Метрология (теоретические, прикладные и законодательные основы) : учеб. пособие / В. А. Кузнецов, Г. Я. Ялунина. - Москва : ИПК Изд-во стандартов, 1998.

2. ГОСТ 30012.1-2002. Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним. Ч.1. Определения и основные требования, общие для всех частей.

3. Вострокнутов, Н. Н. Поверка и калибровка измерительных преобразователей электрических величин : конспект лекций / Н. Н. Вострокнутов. – Москва : АСМС, 2012.

4. ГОСТ Р 8.596-2002. ГСИ. Метрологическое обеспечение измерительных систем. Основные положения.

5. ГОСТ 8.417-2002. ГСИ. Единицы величин.

6. ГОСТ Р 8.736-2011. ГСИ. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

7. ГОСТ Р МЭК 870-5-1-95. Устройства и системы телемеханики. Ч. 5. Протоколы передачи. Разд. 1. Форматы передаваемых кадров.

8. ГОСТ 21128-83. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения до 1000 В.

9. ГОСТ Р 54500.3-2011. Неопределенность измерения. Ч. 3. Руководство по выражению неопределенности измерения.

10. ПМГ 96-2009. ГСИ. Результаты и характеристики качества измерений. Формы представления.

11. РМГ 91-2009. ГСИ. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы.

12. ГОСТ 8.401-80. ГСИ. Классы точности средств измерений. Общие требования.

13. ГОСТ 8.009-84. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.

14. ГСИ. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений : методический материал по применению ГОСТ 8.009-84.

15. ГОСТ Р 51840-2001. Программируемые контроллеры. Общие положения и функциональные характеристики.

16. ГОСТ 8.567-2014. ГСИ. Измерения времени и частоты. Термины и определения.

17. Борисочкин, В. Эталонные сигналы частоты и времени / В. Борисочкин, С. Каган, Г. Черенков // Радио. – 2000. – № 2.

18. Положение о Государственной службе времени, частоты и определения параметров вращения Земли : утв. Постановлением Правительства РФ № 225 от 23.01.2001 г.

19. ГОСТ 8.515-2016. ГСИ. Эталонные сигналы частоты и времени, излучаемые специализированными радиостанциями Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли. Временной код.

20. Одуан, К. Измерение времени. Основы GPS / К. Одуан, Б. Гино. – Москва : Техносфера, 2002.

21. ГОСТ 22261-94. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия.

22. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды.

23. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.

24. ГОСТ Р 50397-2011. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения.

25. ГОСТ Р 51318.22-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от оборудования информационных технологий. Нормы и методы испытаний.

26. ГОСТ 30804.4.2-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний.

27. ГОСТ 30804.4.4-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний.

28. ГОСТ Р 51317.4.3-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю. Требования и методы испытаний.

29. ГОСТ 30804.4.11-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к провалам, кратковременным прерываниям и изменениям напряжения электропитания. Требования и методы испытаний.

30. Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике. Вып. 4. Кинетика, теплота, звук / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – Москва : Мир, 1977.

31. ГОСТ 26.205-88. Комплексы и устройства телемеханики. Общие технические условия.

32. Новицкий, П. В. Основы информационной теории измерительных устройств / П. В. Новицкий. – Ленинград : Энергия. Ленингр. отд-ние, 1968.

33. ГОСТ Р ИСО/МЭК 7498-1-99. Информационная технология. Взаимосвязь открытых систем. Базовая эталонная модель. Ч. 1. Базовая модель.

34. Гук, М. Аппаратные средства локальных сетей : энциклопедия / М. Гук. – Санкт-Петербург : Питер, 2000.

35. ГОСТ Р МЭК 870-1-4-98. Устройства и системы телемеханики. Ч. 1. Основные положения. Разд. 4. Основные аспекты передачи телемеханических данных и руководство по использованию стандартов МЭК 870-5 и МЭК 870-6.

36. ГОСТ 26.014-81. Средства измерений и автоматизации. Сигналы электрические кодированные входные и выходные.

37. Захаров, В. А. Ошибки информационного обмена в цифровых каналах передачи информации измерительных систем / В. А. Захаров, Т. Ю. Поздеева, А. Л. Невзоров // Метрология. – 2013. – № 7.

38. Вьюхин, В. Н. Исследование метода когерентной выборки для тестирования высокоразрядных АЦП / В. Н. Вьюхин, Ю. А. Попов, Ю. Л. Тани // Автометрия. – 1997. – № 5.

39. Топильский, В. Б. Схемотехника аналого-цифровых преобразователей : ученое. изд. / В. Б. Топильский. – Москва: Техносфера, 2014.

40. Тревис, Д. LabVIEW для всех / Д. Тревис ; пер. с англ. Н. А. Клушина. – Москва : ДМК Пресс, 2005.
41. Сапожников, А. В. Конструирование трансформаторов / А. В. Сапожников. – 2-е изд., перераб. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1959.
42. Кислицин, А. Л. Трансформаторы : учеб. пособие по курсу «Электромеханика» / А. Л. Кислицин. – Ульяновск : УЛГТУ, 2001.
43. Гайдуков, Ю. П. Физические основы и методы получения магнитного поля / Ю. П. Гайдуков // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 4. – С. 97–105.
44. Калашников, С. Г. Электричество : учеб. пособие / С. Г. Калашников. – 6-е изд., стереотип. – М. : Физматлит, 2003.
45. Основы электроизмерительной техники / под ред. М. И. Левина. – Москва : Энергия, 1972.
46. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники. Т. 1., гл. 5. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчан – 1981.
47. ГОСТ 18685-73. Трансформаторы тока и напряжения. Термины и определения.
48. Электрические измерения : учеб. пособие для вузов / под ред. В. Н. Малиновского. – Москва : Энергоатомиздат, 1985.
49. ГОСТ 7746-2015. Трансформаторы тока. Общие технические условия.
50. ГОСТ 9920-89. Электроустановки переменного тока на напряжение от 3 до 750 кВ. Длина пути утечки внешней изоляции.
51. ГОСТ 1983-2015. Трансформаторы напряжения. Общие технические условия.
52. ГОСТ 8.217-2003. ГСИ. Трансформаторы тока. Методика поверки.
53. Порядок проведения поверки СИ, требования к знаку поверки и содержанию свидетельства о поверке : утв. Приказом Минпромторга РФ № 1815 от 02.07.2015 г.
54. ГОСТ 8.216-2011. ГСИ. Трансформаторы напряжения. Методика поверки.

55. Евдокимов, Ф. Е. Теоретические основы электротехники / Ф. Е. Евдокимов. - 9-е изд., стереотип. – Москва: Академия, 2004.

56. ГОСТ 31818.11-2012. Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Общие требования. Испытания и условия испытаний. Ч. 11. Счетчики электрической энергии.

57. ГОСТ 31819.11-2012. Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Ч. 11. Электромеханические счетчики активной энергии классов точности 0,5; 1 и 2.

58. ГОСТ 31819.21-2012. Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Ч. 21. Статические счетчики активной энергии классов точности 1 и 2.

59. ГОСТ 31819.22-2012. Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Ч. 22. Статические счетчики активной энергии классов точности 0,2S и 0,5S.

60. ГОСТ 31819.23-2012. Аппаратура для измерения электрической энергии переменного тока. Частные требования. Ч. 23. Счетчики статические реактивной энергии.

61. ГОСТ 6570-96. Счетчики электрические активной и реактивной энергии индукционные. Общие технические условия.

62. ГОСТ 8.584-2004. ГСИ. Счетчики статические активной электрической энергии переменного тока. Методика поверки.

63. ГОСТ 8.259-2004. ГСИ. Счетчики электрические индукционные активной и реактивной энергии. Методика поверки.

64. МИ 3322-2011. ГСИ. Счетчики электрические активной и реактивной энергии. Методика поверки на местах эксплуатации при помощи комплекта переносных средств поверки производства «НПП МАРС-ЭНЕРГО».

65. МСЗ.055.026 РЭ. Приборы электроизмерительные эталонные многофункциональные «Энергомонитор–1К». Руководство по эксплуатации. Ред. 3, 2010 г.

66. ГОСТ Р 51841-2001. Программируемые контроллеры. Общие технические требования и методы испытаний.

67. МИ 3000-2006. ГСИ. Системы автоматизированные информационно-измерительные коммерческого учета электрической энергии. Типовая методика поверки.

68. Методика осуществления коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя : утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства №99/пр от 17.03.2014.

69. Правила коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя : утв. Постановлением Правительства РФ № 1034 от 18.11.2013.

70. Физика. Большой энциклопедический словарь / гл. ред. А. М. Прохоров. – Москва : Большая Российская энциклопедия, 1998.

71. ГОСТ Р 8.778-2011. ГСИ. Средства измерений тепловой энергии для водяных систем теплоснабжения. Метрологическое обеспечение. Основные положения.

72. ГОСТ Р 8.614-2005. ГСИ. Государственная служба стандартных справочных данных. Основные положения.

73. ГСССД 187-99. Таблицы стандартных справочных данных. Вода. Удельный объем и энтальпия при температурах 0...1000 °С и давлениях 0,001...1000 МПа.

74. МИ 2412-97. ГСИ. Водяные системы теплоснабжения. Уравнения измерений тепловой энергии и количества теплоносителя.

75. ГОСТ 8.271-77. ГСИ. Средства измерений давления. Термины и определения.

76. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества : справочник. Кн.1. / П. П. Кремлевский. - 5-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург. : Политехника, 2002.

77. ГОСТ 2405-88. Манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напорометры, тягомеры и тягонапорометры. Общие технические условия.

78. ГОСТ 22520-85. Датчики давления, разрежения и разности давлений с электрическими аналоговыми выходными сигналами ГСП. Общие технические условия.

79. Преображенский, В. П. Теплотехнические измерения и приборы учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплоэнергетических процессов» / В. П. Преображенский. - 3-е изд., перераб. – М. : Энергия, 1978.

80. ГОСТ Р 8.585-2001. ГСИ. Термопары. Номинальные статистические характеристики преобразования.

81. ГОСТ 6651-2009. ГСИ. Термопреобразователи сопротивления из платины, меди и никеля. Общие технические требования и методы испытаний.

82. ГОСТ 2939-63. Газы. Условия для определения объема.

83. ГОСТ 15528-86. Средства измерений расхода, объема или массы протекающих жидкости и газа. Термины и определения.

84. Киясбейли, А. Ш. Вихревые измерительные приборы / А. Ш. Киясбейли, М. Е. Перельштейн. – Москва : Машиностроение, 1978.

85. ГОСТ 6019-83. Счетчики холодной воды крыльчатые. Общие технические условия.

86. ГОСТ 14167-83. Счетчики холодной воды турбинные. Технические условия.

87. ГОСТ 8.586.1-2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 1. Принцип метода измерений и общие требования.

88. ГОСТ 8.586.2-2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 2. Диафрагмы. Технические требования.

89. ГОСТ 8.586.3-2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования.

90. ГОСТ 8.586.4-2005. ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Ч. 4. Трубы Вентури. Технические требования.

91. Савельев, И. В. Курс общей физики. Т. 1 : Механика, колебания и волны, молекулярная физика / И. В. Савельев. – Москва : Наука, 1970.

92. ГОСТ 8.439-81. ГСИ. Расход воды в напорных трубопроводах. Методика выполнения измерений методом площадь–скорость.

93. МИ 2667-2011. ГСИ. Расход и количество жидкостей и газов. Методика измерений с помощью осредняющих напорных трубок «ANNUBAR DIAMOND II+», «ANNUBAR 285», «ANNUBAR 485», «ANNUBAR 585». Основные положения.

94. ГОСТ Р 51649-2014. Теплосчетчики для водяных систем теплоснабжения. Общие технические условия.

95. МИ 2714-2002. ГСИ. Энергия тепловая и масса теплоносителя в системах теплоснабжения. Методика выполнения измерений. Основные положения.

96. ГОСТ Р 52931-2008. Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия.

97. МИ 2439-97. ГСИ. Метрологические характеристики измерительных систем. Номенклатура. Принципы регламентации, определения и контроля.

98. ГОСТ 4.199-85. СПКП. Системы информационные электроизмерительные. Комплексы измерительно-вычислительные. Номенклатура показателей.

99. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : учебник для вузов / Е. С. Вентцель. – 6-е изд., стереотип. – Москва : Высшая школа, 1999.

100. Захаров, В. А. К оценке доверительных границ погрешности сложного измерительного канала измерительной системы / В. А. Захаров, Ю. И. Дидик // Метрологическое обеспечение измерительных систем : сб. докл. X Всерос. науч.-техн. конф., Пенза, 2017. – С. 47-52.

101. РД 153-34.0-11.209-99. Автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии и мощности. Типовая методика выполнения измерений электроэнергии и мощности.

102. ГОСТ Р 8.728-2010. ГСИ. Оценивание погрешностей измерений тепловой энергии и массы теплоносителя в водяных системах теплоснабжения.

103. ГОСТ Р 8.892-2015. ГСИ. Метрологическое обеспечение. Анализ состояния на предприятии, в организации, объединении.

104. ГОСТ Р 8.820-2013. ГСИ. Метрологическое обеспечение. Основные положения.

105. Федеральный закон № 412-ФЗ от 28.12.2013 «Об аккредитации в национальной системе аккредитации».

106. РМГ 63-2003. ГСИ. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации.

107. ГОСТ 34.602-89. Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Техническое задание на создание автоматизированной системы.

108. МИ 3290-2010. ГСИ. Рекомендация по подготовке, оформлению и рассмотрению материалов испытаний средств измерений в целях утверждения типа с изменениями № 1, 2, 3 и 4.

109. Административный регламент предоставления Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии государственной услуги по ведению единого реестра зарегистрированных систем добровольной сертификации : утвержден Приказом Минпромторга № 1440 от 10.10.2012.

110. Положение о системе добровольной сертификации средств измерений : утвержден Приказом ФГУП «ВНИИМС» № 117 от 10.09.2001.

111. Система добровольной сертификации программного обеспечения средств измерений. Правила функционирования. утверждено Приказом ФГУП «ВНИИМС» : дата введения 23.01.2013.

112. МИ 187-86. ГСИ. Достоверность и требования к методам поверки средств измерений.

113. МИ 188-86. ГСИ. Средства измерений. Установление значений параметров методик поверки.

114. МИ 1202-86. ГСИ. Приборы и преобразователи измерительные напряжения, тока, сопротивления цифровые. Общие требования к методике поверки.

115. Вострокнутов, Н. Н. Цифровые электроизмерительные приборы : учеб. пособие / Н. Н. Вострокнутов. – Москва : АСМС, 2011.

116. ГОСТ Р 56069-2018. Требования к экспертам и специалистам. Поверитель средств измерений. Общие требования.

117. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.

118. Положение о Федеральной службе по аккредитации : утверждено Постановлением Правительства РФ № 845 : дата введения 17.10.2011 г.

119. Критерии аккредитации и перечень документов, подтверждающих соответствие заявителя и аккредитованного лица критериям аккредитации : утв. Приказом Минэкономразвития № 326 от 30.05.2014 г.

120. Положение о признании результатов калибровки при поверке СИ в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений : утв. Постановлением Правительства РФ № 311 от 02.04.2015.

121. Положение об осуществлении федерального государственного метрологического надзора : утв. Постановлением Правительства РФ № 246 от 06.04.2011.

122. ГОСТ Р 8.884-2015. ГСИ. Метрологический надзор, осуществляемый метрологическими службами юридических лиц. Основные положения.

123. Автоматизированные системы теплоснабжения и отопления / С. А. Чистович. – Ленинград : Стройиздат, 1987. – 248 с.

124. Брюханов, О. Н. Газифицированные котельные агрегаты / О. Н. Брюханов, В. А. Кузнецов. – Москва : Инфра-М, 2010. – 391 с.

125. Варфоломеев, Ю. М. Отопление и тепловые сети / Ю. М. Варфоломеев, О. Я. Кокорин. – Москва : Инфра-М, 2010. – 480 с.

126. ГОСТ 21.404–85. Условные обозначения приборов и средств автоматизации технологических процессов. – Москва : Изд-во стандартов, 1985.

127. Калмаков, А. А. Автоматика и автоматизация систем теплогазоснабжения и вентиляции / А. А. Колмаков. – Москва : Стройиздат, 1986. – 479 с.

128. Клюев, А. С. Наладка систем автоматического регулирования барабанных паровых котлов / А. С. Клюев, А. Г. Лебедев, С. И. Новиков. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 280 с.

129. Плетнев, Г. П. Автоматическое регулирование и защита теплоэнергетических установок электрических станций / Г. П. Плетнев. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 368 с.

130. Плетнев, Г. П. Автоматическое управление объектами тепловых электростанций / Г. П. Плетнев. – Москва : Энергоиздат, 1981. – 368 с.

131. Соколов, Б. А. Устройство и эксплуатация оборудования газомазутных котельных / Б. А. Соколов. – Москва : Академия, 2007. – 302 с.

132. Техника чтения схем автоматического управления и технологического контроля. – Москва : Энергоатомиздат, 1991.

133. МИ 3286-2010. Проверка защиты программного обеспечения и определение ее уровня при испытаниях средств измерений в целях утверждения типа.

134. Кудеяров, Ю. А. Испытания (тестирование) программного обеспечения средств измерений : учеб. пособие / Ю. А. Кудеяров. – Москва : АСМС, 2010.

135. OIML D 31:2008. General requirements for software controlled measuring instruments = Общие требования к измерительным приборам с программным управлением.

136. WELMEC 7.2. Issue 5. Software Guide Measuring Instruments Directive 2004/22/EC, March 2012 = Руководство по программному обеспечению Директива по измерительным приборам 2004/22/EC, Март 2012.

137. Слаев, В. А. Аттестация программного обеспечения, используемого в метрологии : справ. кн. / В. А. Слаев, А. Г. Чуновкина ; под ред. В. А. Слаева. – Санкт-Петербург : Проффессионал, 2009.

138. МИ 2174-91. ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения.

139. МИ 2955-2010. ГСИ. Типовая методика аттестации программного обеспечения средств измерений.

140. ГОСТ 17657-79. Передача данных. Термины и определения.

141. Воройский, Ф. С. Информатика. Новый систематизированный толковый словарь-справочник (Введение в современные информационные и телекоммуникационные технологии в терминах и фактах) / Ф. С. Воройский. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Физматлит, 2003.

142. Игнатов, В. А. Теория информации и передачи сигналов : учебник для вузов / В. А. Игнатов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Радио и связь, 1991.

143. ГОСТ 26.011-80. Средства измерений и автоматизации. Сигналы тока и напряжения электрические непрерывные входные и выходные.

144. ГОСТ 26.010-80. Средства измерений и автоматизации. Сигналы частотные электрические непрерывные входные и выходные.

145. ГОСТ 26.013-81. Средства измерений и автоматизации. Сигналы электрические с дискретным изменением параметров входные и выходные.

146. ГОСТ 26.012-94. Приборы и средства автоматизации. Сигналы гидравлические входные и выходные.

147. ГОСТ 26.015-81. Средства измерений и автоматизации. Сигналы пневматические входные и выходные.

148. Митюшкин, К. Г. Телеконтроль и телеуправление в энергосистемах / К. Г. Митюшкин. – Москва : Энергоатомиздат, 1990.

*Учебное издание*

Иванников Валерий Павлович

**Технические измерения и автоматизация  
в тепло- и электроэнергетике**

Учебное пособие

*Редактор Т. В. Опарина*

Подписано в печать 24.10.2022. Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 21,74. Уч. изд. л. 19,07

Тираж 28 экз. Заказ № 1779.

Издательский центр «Удмуртский университет»  
426004, Ижевск, ул. Ломоносова, 4Б, каб. 021  
Тел. : + 7 (3412) 916-364, E-mail: editorial@udsu.ru

Типография Издательского центра «Удмуртский университет»  
426034, Ижевск, ул. Университетская, 1, корп. 2.  
Тел. 68-57-18