

ПРЕДИСЛОВИЕ

В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года», утвержденных XXVII съездом КПСС, поставлены задачи повышения качества продукции, эффективности управления и интенсификации технологических процессов в нефтеперерабатывающей, нефтехимической, газоперерабатывающей и ряде других отраслей промышленности. В решении этих задач особая роль принадлежит автоматизированным системам управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Базовой системой любой современной АСУ ТП является система автоматического контроля, позволяющая получать измерительную информацию о режимных параметрах процессов, а также о параметрах качества сырья, промежуточных и конечных продуктов. Эффективностью работы системы автоматического контроля во многом определяется эффективность работы всей АСУ ТП. Так, рациональная система автоматического контроля позволяет: осуществить управление по показателям качества сырья и продуктов, упростить алгоритмы и структуру АСУ ТП, уменьшить ее стоимость, повысить надежность и улучшить качество продукции.

Научной основой систем автоматического контроля являются метрология и физические принципы измерений параметров технологических процессов, а технической базой этих систем служат средства измерений и преобразований соответствующих параметров. Весь этот круг вопросов и рассматривает дисциплина «Технологические измерения и приборы» применительно к той или иной отрасли промышленности.

В учебнике наряду с общими концепциями автоматического контроля, характерными для различных отраслей промышленности, нашли отражение специальные вопросы, касающиеся особенностей химико-технологических процессов, связанных с переработкой нефти и газа.

В основу книги положен курс лекций, читаемый авторами на протяжении многих лет в Азербайджанском институте нефти и химии им. М. Азизбекова.

Кроме традиционных сведений, обычно включаемых в учебную литературу по технологическим измерениям, в данный учебник вошли новые материалы, освещающие: метрологические аспекты промышленного измерительного эксперимента; применение средств вычислительной техники, в том числе микропроцессоров, в технологических измерениях; основы метрологического обеспечения

средств технологических измерений; принципы и средства автоматического контроля загрязнений окружающей среды; принципы и средства автоматического контроля топливно-энергетических ресурсов.

Для усвоения материала книги необходимы знания в объеме курсов вузов по математике, физике, химии, термодинамике, электронике и теории автоматического управления.

В связи с непрерывным совершенствованием конструкций современных средств измерений, происходящим гораздо быстрее, чем эволюция принципов действия последних, принятая в книге методика изложения материала предусматривает разбор принципов, действия средств измерений и их принципиальных схем. При этом предполагается, что конструкции средств измерений, правила их монтажа и эксплуатации студенты изучают в процессе выполнения лабораторных работ и курсового проекта по технологическим измерениям, а также при последующем изучении дисциплин, связанных с проектированием, монтажом и эксплуатацией средств автоматизации.

Терминология, используемая в книге, соответствует действующим государственным стандартам; размерности физических величин приведены в СИ.

Предисловие, введение, заключение, гл. 1—3 написаны Н. Г. Фарзанае и Л. В. Илясовым, гл. 6 и 7 — Н. Г. Фарзанае, гл. 9—14 — Л. В. Илясовым, гл. 4, 5, 8 и 15 — А. Ю. Азим-заде.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность коллективу кафедры автоматизации производственных процессов Московского института нефти и газа им. акад. И. М. Губкина и д-ру техн. наук, проф. М. В. Кулакову за труд по рецензированию книги и сделанные при этом полезные замечания.

Отзывы и предложения по улучшению книги просьба направлять по адресу: 101430, ГСП-4, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».

ВВЕДЕНИЕ

С различными измерениями человек сталкивается с момента своего рождения всю жизнь, осуществляя их самостоятельно или наблюдая за выполнением измерений. Достаточно вспомнить как часто приходится использовать стеклянные термометры, линейки, весы и др.

Всем известно понятие «мерить» («измерять»). Под ним в быту понимают определенную операцию, которая без труда выполняется с помощью названных приборов. В настоящее время простейшие измерения осуществляются уже учениками младших классов школы. Наряду с этим современные фундаментальные научные исследования требуют проведения сложнейших измерений, постановку и выполнение которых осуществляют целые научные организации, располагающие специалистами высшей квалификации. В то же время общей для указанных и всех других измерений является осуществляемая при каждом измерении экспериментальная операция, состоящая в сравнении измеряемой физической величины с одноименной ей величиной, принятой за единицу. Целью такого сравнения является определение количественной оценки (значения) измеряемой величины в виде определенного числа принятых для нее единиц. За внешней простотой указанной экспериментальной операции скрываются глубокие философские концепции, связанные с материалистическими представлениями о познаваемости явлений природы.

Измерения осуществляются с помощью специальных технических средств, различных по сложности и принципам действия. Указанные технические средства называют *измерительными устройствами, установками или системами* (см. гл. 2).

Совокупность технических средств, служащих для выполнения измерений, методов и приемов проведения измерений и интерпретации их результатов, принято определять понятием *измерительная техника*.

Исторически развитие измерительной техники неразрывно связано с развитием потребностей общества. XX век характеризуется ускоренным развитием науки и промышленного производства. Последнее немислимо без широчайшего применения самых разнообразных измерений и измерительных устройств.

Место измерительной техники в современном мире могут характеризовать следующие данные. Затраты на измерительную технику в настоящее время составляют 10—15 % всех материальных затрат на общественное производство, а в таких отраслях промышленности,

как нефтеперерабатывающая, нефтехимическая, химическая, радиоэлектронная, самолетостроительная и другие, эти затраты достигают 25%.

В нашей стране ежедневно проводится более 20 млрд. измерений. Выполнением измерений и связанных с ними операций контроля занимается более 3 млн. трудящихся. В настоящее время без измерений не может обойтись практически ни одна область деятельности человека.

Основной потребитель измерительной техники — промышленность. Здесь измерительная техника является неотъемлемой частью технологических процессов, так как используется для получения информации о многочисленных режимных параметрах, определяющих ход процессов. На использовании разнообразных и часто сложных измерительных устройств и установок базируется в промышленности контроль качества продукции и сырья.

Область измерительной техники, объединяющую измерительные устройства и методы измерений, используемые в технологических процессах, принято определять понятием *технологические измерения*.

Набор измеряемых параметров, включаемых в технологические измерения, весьма различен для различных отраслей промышленности и во многом зависит от специфики технологических процессов.

Все производства различных отраслей промышленности в зависимости от характера технологического процесса можно подразделить на две группы: производства с непрерывным и производства с дискретным (штучным) характером технологических процессов. К первой группе относятся производства таких отраслей промышленности, как нефтеперерабатывающая, газоперерабатывающая, нефтехимическая, химическая, металлургическая, теплоэнергетическая и др., ко второй группе — машиностроение, приборостроение, радиоэлектронная, пищевая и др. Приближенное представление о том, какие параметры и в каком относительном количестве измеряются на производствах с непрерывным и дискретным характером технологических процессов, поможет составить табл. В.1 [8].

Из таблицы следует, что на производствах с непрерывным характером технологических процессов (к таким производствам относятся практически все, в которых используются химико-технологические процессы) измерения давления, температуры, расхода, уровня и количества вещества составляют более 86 % от общего числа всех измерений. Остаточные 14 % измерений составляют измерения состава и физико-химических свойств вещества, а также электрических величин.

Измерения давления, температуры, расхода и уровня принято называть *теплотехническими измерениями*; измерения состава и физико-химических свойств вещества — *физико-химическими измерениями*, а измерения электрических величин — *электрическими измерениями*. Таким образом, технологические измерения для химическо-технологических

Таблица В.1

Измерения параметров производств с непрерывным и дискретным характером технологических процессов

Параметр	Количество в % от общего числа измерений для каждого из производств	
	производства с непрерывными процессом	производства с дискретными процессом
Температура	50	8
Расход (массовый, объемный) вещества	15	4
Количество (масса, объем) вещества	5	5
Давление	10	4
Уровень	6	4
Число изделий	—	25
Длина (размеры, положение, расстояние)	—	25
Время	4	15
Состав веществ	4	—
Прочие (физико-химические свойства, напряжение, ток, скорость)	6	10

процессов включают в себя теплотехнические, физико-химические и электрические измерения.

В производствах с непрерывными технологическими процессами, в том числе с химико-технологическими, над исходными веществами (сырьем и реагентами) осуществляют непрерывно во времени различные операции в аппаратах, соединенных технологическими линиями. Указанные операции направлены на изменение физико-химических свойств состава или состояния исходных веществ. В результате проведения процесса получают готовые продукты заданной номенклатуры и качества.

Современные производства нефтегазоперерабатывающей, нефтехимической и других отраслей промышленности характеризуются сложностью, значительной мощностью технологических аппаратов и большим числом различных параметров, от которых зависит протекание химико-технологических процессов. Все это определяет тот факт, что проведение современных технологических процессов без их частичной или полной автоматизации невозможно.

Автоматизацией производственного процесса называют такую организацию этого процесса, при которой его технологические операции осуществляются автоматически с помощью специальных технических устройств без непосредственного участия человека. Автоматизация технологического производства предполагает автоматический контроль технологических параметров, автоматическое регулирование и автоматическое (см. приложение 1) или автоматизированное управление, а также защиту процессов от аварийных

режимов, сигнализацию отклонений от номинальных режимов, защиту окружающей среды.

Для автоматического контроля, регулирования и управления необходимо располагать определенной информацией о состоянии объекта автоматизации. Эту информацию получают путем проведения измерений. Для оценки роли измерений в автоматизации химико-технологических процессов рассмотрим как решаются здесь вопросы автоматического контроля, регулирования и управления. При решении этих вопросов используются: системы автоматического контроля (САК); автоматические системы регулирования (АСР) и автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Автоматический контроль является наиболее старым и в то же время наиболее важным видом автоматизации. По существу развитие автоматизации началось с создания и применения в технологических процессах систем автоматического контроля.

На рис. В.1, а показана схема системы автоматического контроля некоторого объекта автоматизации OA (в данном случае объект

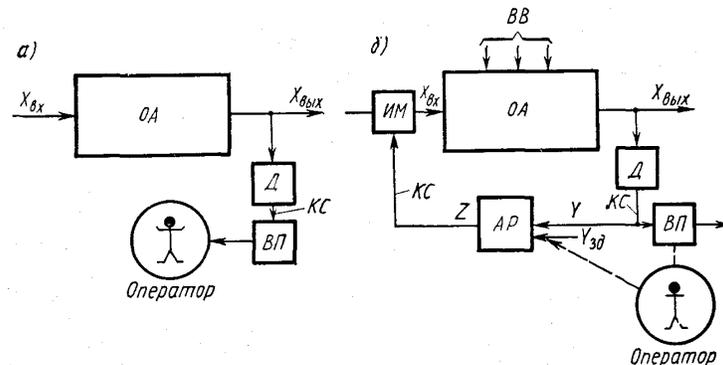


Рис. В.1. Схемы систем автоматического контроля (а) и автоматического регулирования (б)

автоматизации называют объектом контроля). Схема, как правило, включает в свой состав по меньшей мере два измерительных устройства, соединенных между собой каналом связи.

Одно из этих измерительных устройств воспринимает измеряемый параметр $X_{вых}$ объекта автоматизации; его называют датчиком D (или первичным измерительным преобразователем). Датчик служит для преобразования физического параметра в другой параметр — сигнал (например, электрический ток, давление сжатого воздуха и т. д.), который удобно передавать по каналу связи $КС$. Другое устройство, называемое вторичным прибором $ВП$, измеряет сигнал, поступающий по каналу связи и несущий информацию о

значении измеряемого параметра, а затем представляет его в форме, удобной для восприятия человеком-оператором.

Наблюдая за показанием *ВП* и зная установленную норму для значения измеряемого параметра (допустимые отклонения часто наносятся на шкалу вторичного прибора), человек-оператор может осуществлять контроль, а при необходимости и ручное регулирование объекта автоматизации. В последнем случае с помощью соответствующих устройств оператор изменяет подачу X_{ex} материального потока или энергии на вход объекта до тех пор, пока значение измеряемого параметра не достигнет установленной нормы.

Применение систем автоматического контроля характерно для начального этапа развития автоматизации, когда число технологических аппаратов и измеряемых параметров было небольшим. С развитием технологии нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и других отраслей промышленности количество аппаратов, используемых для проведения процесса, быстро увеличивалось. На смену ручному регулированию пришло автоматическое. Тенденция такова, что развитие автоматизации производственных процессов неотступно следует за развитием технологии этих процессов.

На рис. В.1, б показана схема автоматической системы регулирования. Необходимость регулирования, как ручного, так и автоматического, вызвана тем, что на объект автоматизации (в данном случае его называют объектом регулирования) постоянно действуют различные дестабилизирующие факторы, нарушающие однозначность связи между входным X_{ex} и выходным $X_{вых}$ параметрами объекта. Эти факторы называют возмущающими воздействиями *ВВ*. Под влиянием *ВВ* выходной параметр $X_{вых}$ отклоняется от заданного значения (нормы). Датчик *Д* измеряет текущее значение параметра $X_{вых}$ и преобразует его в сигнал *У*, который поступает на вторичный прибор *ВП* и специализированное вычислительное устройство, называемое автоматическим регулятором *АР*. В автоматический регулятор кроме сигнала *У* поступает сигнал Y_{zd} (задание), который пропорционален заданному значению регулируемого параметра $X_{вых}$ и имеет такую же природу, как сигнал *У*. Автоматический регулятор выполняет определенные вычислительные операции в соответствии с заложенным в него законом регулирования и обрабатывает сигнал *Z* — регулирующее воздействие, поступающий к исполнительному механизму *ИМ*. Последний изменяет подачу X_{ex} материи или энергии в объект регулирования до тех пор, пока параметр $X_{вых}$ не достигнет заданного значения.

Кроме рассмотренной простейшей автоматической системы регулирования применяются каскадные, комбинированные, автономные, программные и др. Работа этих систем строится на информации, получаемой от одной или нескольких систем автоматического контроля.

Функции управления производственным процессом в системах автоматической стабилизации или программного регулирования па-

раметров выполнял человек-оператор, который в основном руководствовался своим субъективным опытом.

Развитие полупроводниковой вычислительной техники сделало возможной автоматизацию управления путем применения электронных вычислительных машин (ЭВМ) и микропроцессоров (МП) непосредственно в технологических процессах. Это ознаменовало новый этап развития автоматизации, характерной чертой которого для непрерывных технологических процессов явился переход к их оптимальному управлению.

Для оптимизации (см. приложение 1) используются АСУ ТП, технической базой которых помимо САК и АСР являются ЭВМ, снабженные соответствующими устройствами и способные участвовать в технологических процессах. Их называют *управляющими вычислительными машинами (УВМ)*.

Схема АСУ ТП с УВМ показана на рис. В.2, а. В объект автоматизации *ОА*, в данном случае представляющий собой химико-технологический процесс или ряд технологических процессов, составляющих

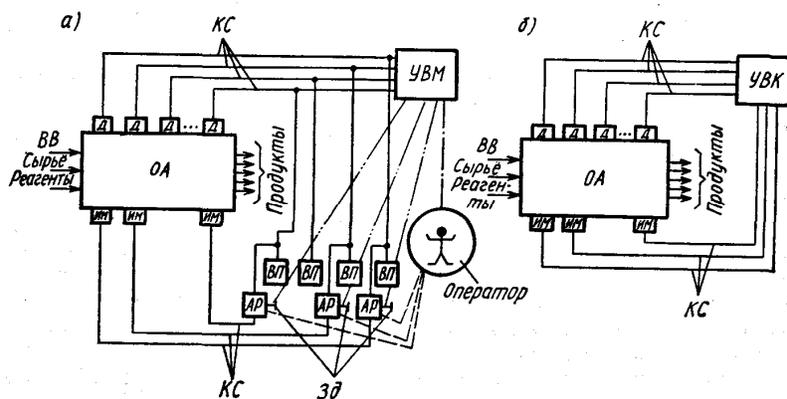


Рис. В.2. Схемы автоматизированных систем управления технологическими процессам

целое производство, поступают сырье и реагенты, необходимые для проведения процесса (входные параметры объекта). В результате получается ряд продуктов. На объект автоматизация (в данном случае его называют объектом управления) непрерывно оказывают влияние возмущающие воздействия *ВВ*. С помощью датчиков *Д* измеряют режимные параметры и параметры, определяющие качество продуктов (выходные параметры объекта), а также значения входных параметров объекта управления. Информация о результатах этих измерений по каналам связи *КС* поступает во вторичные приборы *ВП* и автоматические регуляторы *АР*. Последние вырабатывают регулирующие воздействия, поступающие

на исполнительный механизм *ИМ*, которые изменяют подачу энергии или материального потока (управляющие воздействия) в соответствующие аппараты объекта управления. Задание регуляторам устанавливается с помощью задатчиков *Зд*. Таким образом, все названные устройства осуществляют автоматический контроль или наряду с ним и автоматическое регулирование режимных параметров объекта управления.

Как видно из рис. В.2, *а*, сигналы датчиков одновременно поступают на УВМ. Для использования УВМ в целях управления технологическими процессами предварительно проводится большая исследовательская работа, в результате которой должны быть определены: математическая модель объекта управления, критерий управления (оптимизации), ограничения и алгоритм управления (см. приложение 1). Использование УВМ позволяет решать общую задачу управления технологическими процессами, состоящую в следующем: в текущей ситуации на объекте управления, определяемой входными параметрами и возмущающими воздействиями, найти такие значения управляющих воздействий при известных ограничениях, при которых удовлетворяется критерий оптимизации, а выходные параметры не выходят за заданные пределы. Возможность решения с помощью УВМ указанной задачи позволяет полностью автоматизировать управление технологическими процессами и отказаться от использования субъективного опыта управления ими человека-оператора.

Вычислительная техника используется в АСУ ТП в одном из следующих режимов.

Режим советов (советчика) оператору. Текущую информацию УВМ получает от датчиков и на основе этой информации решает задачу оптимизации. В результате решения определяются значения технологических параметров, обеспечивающие достижение критерия оптимизации в текущей ситуации. Эти значения технологических параметров используются оператором, обслуживающим процесс в качестве рекомендаций (советов). За оператором остается право выбора и установки (в виде заданий соответствующим регуляторам) рекомендуемых значений параметров (см. пунктирные линии рис. В.2, *а*).

Супервизорный (от англ. *supervision*—наблюдение, надзор) *режим.* УВМ с помощью специальных средств сама устанавливает такие задания регуляторам, которые соответствуют рассчитанным значениям (штрихпунктирные линии на рис. В.2, *а*).

Рассмотренные режимы используются в случае, если применяемые УВМ не обладают необходимой надежностью.

Режим непосредственного цифрового управления (НЦУ). В состав АСУ ТП включается управляющий вычислительный комплекс (УВК) (см. рис. В.2, *б*). При этом уже не используются автоматические регуляторы и вторичные приборы для стабилизации и контроля отдельных параметров, а все эти функции возложены на УВК. Обычно УВК строят на базе микропроцессорной техники по рас-

пределенному (децентрализованному) принципу, в соответствии с которым функции управления распределены между отдельными микропроцессорами.

Информация о ходе процесса при таком режиме управления на одном или нескольких черно-белых или цветных дисплеях (от англ. *display* — показ, выставка) отображается в буквенно-цифровой или графической форме.

Итак, работа САК, АСР и АСУ ТП строится на измерениях, осуществляемых датчиками. Этим определяется первостепенное значение измерений для систем автоматизации любого уровня и сложности, что в свою очередь делает необходимым приобретение студентами глубоких знаний основ измерительной техники и современных средств автоматического контроля режимных параметров химико-технологических процессов и качества сырья, реагентов, промежуточных и конечных продуктов этих процессов.

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ

§ 1.1. Сущность и основные характеристики измерений

Теоретической основой измерительной техники является метрология.

Метрология (от греч. *metron* — мера и *logos* — учение, понятие) — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. Как следует из определения, предметом метрологии помимо самих измерений является обеспечение их единства и требуемой точности. При этом под *единством измерений* понимают такое состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Единство измерений необходимо для того, чтобы можно было сопоставлять результаты измерений, выполненных различными измерительными устройствами, в разных местах и в разное время. Причем сохранение единства измерений является важным как внутри страны, так и во взаимоотношениях между странами.

Ниже рассматривается ряд относящихся к измерениям понятий, используемых в настоящее время в метрологии и измерительной технике.

Физической величиной называют свойство, общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого объекта.

Под физическим объектом при этом понимают физические системы, их состояние, происходящие в них процессы, а также объекты химии и других наук, в которых используются физические методы. Индивидуальность в количественном отношении понимают в том смысле, что свойство может быть присуще одному объекту в определенное число раз больше или меньше, чем другому.

Размер физической величины — количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина». Из приведенного определения следует, что понятие «размер» служит для отображения объективно существующего количественного различия между физическими объектами по рассматриваемому свойству. Окружающие человека объекты способны вызывать те или иные ощущения в его органах чувств. Объекты обычно сопоставляются человеком по размерам однородных свойств. При этом человек использует одну из форм своего мышления — сравнение. В результате формируются заключения о сравниваемых

объектах: длиннее или короче, тяжелее или легче, теплее или холоднее и т. п. Общим для этих и подобных заключений являемся признак «больше-меньше». Возможность классификации физических величин по данному признаку является фундаментальной предпосылкой реализуемости любого измерения.

Однородными физическими величинами называют такие, которые можно сравнить по признаку «больше-меньше». Из однородных физических величин разного размера можно составить последовательный ряд, в котором размер каждой входящей в него величины будет больше размера всех предыдущих и меньше размера всех последующих величин. Ряд, составленный в соответствии с данным принципом по однородным физическим свойствам различных физических объектов, называют *последовательным натуральным рядом*.

Для формирования *шкалы* (от лат. *scalae* — лестница) физической величины из последовательного натурального ряда выбирают некоторые физические величины различного размера, которые применяются в качестве *отправных* или *реперных* (от франц. *repere* — столб, рейка) точек. Совокупность выбранных реперных точек образует шкалу или «лестницу» размеров физической величины. Из общего числа реперных точек выбирают две, размеры S_1 и S_0 которых относительно просто реализуются физически с высокой точностью. Эти точки называют *опорными точками* или *основными реперами*. Интервал между размерами S_1 и S_0 называют *основным интервалом шкалы* физической величины. При этом один из размеров — S_0 принимают за начало отсчета, а некоторую n -ю долю этого интервала — за единицу физической величины. Причем выбор числа n в принципе произволен. Таким образом, единицу физической величины определяют путем пропорционального деления основного интервала:

$$[S] = (S_1 - S_0) / n, \quad (1.1)$$

где $[S]$ — некоторый размер физической величины, называемый единицей данной физической величины.

Единица физической величины — это физическая величина, которой, по определению, приписано числовое значение, равное единице. Использование зависимости (1.1) означает, что размеры физической величины, лежащие в интервале между S_i и S_0 , определяются методом линейной интерполяции. Физическая реализация этой интерполяции основывается на *методе измерительных преобразований*.

Измерительное преобразование — отражение размера одной физической величины размером другой физической величины, функционально с ней связанной. Понятие измерительного преобразования с физической точки зрения означает, что физическая величина не может быть определена сама по себе, а может быть воспринята только через тот физический процесс, в котором она проявляется. С помощью измерительных преобразований осуществляют интерполяцию

размеров физической величины внутри интервалов между реперными точками и определяют протяженность таких интервалов. Это позволяет построить на основе выбранного измерительного преобразования *функциональную шкалу* физической величины.

Измерение — это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Измерения обычно осуществляются на естественных или созданных человеком объектах, которые называют объектами измерений.

Объект измерения — это сложное явление или процесс, характеризующийся множеством отдельных физических величин (параметров объекта), каждая из которых может быть измерена в отдельности, но в реальных условиях действует на измерительное устройство совместно со всеми остальными параметрами.

Физическую величину, которая выбрана для измерения, называют *измеряемой величиной*.

Процесс решения любой задачи измерения

включает в себя, как правило, следующие три этапа: подготовку, проведение измерения (измерительного эксперимента) обработку его результатов.

В процессе проведения самого измерения объект измерения *ОИ* (рис. 1.1) и средство измерений *СИ*, способное измерять выбранную физическую величину X , приводятся во взаимодействие.

В общем случае *средством измерений* называют техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические характеристики.

В результате измерения получают значение физической величины, которое представляет собой оценку физической величины в виде некоторого числа принятых для ее измерения единиц.

Результат измерения величины X можно записать в виде формулы, называемой основным уравнением измерения:

$$X=A[X] \tag{1.2}$$

где A — отвлеченное число, называемое *числовым значением* физической величины; $[X]$ — единица физической величины.

Результат измерения — это значение физической величины, найденное путем ее измерения.

Значение физической величины представляет собой оценку этой величины в виде некоторого числа принятых для нее единиц. Размер величины существует реально и остается неизменным. Числовое значение физической величины определяется принятой при измерении единицей этой величины, т. е. один и тот же размер может быть выражен различными числовыми значениями в зависимости от принятой единицы физической величины.

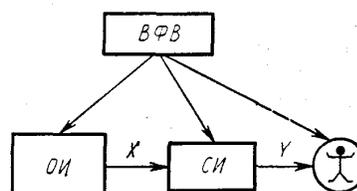


Рис. 1.1. Схема процесса измерения

Различают истинное и действительное значения физической величины.

Истинное значение физической величины — значение физической величины, которое идеальным образом отражало бы в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство объекта.

В философском аспекте истинное значение всегда остается неизвестным, а совершенствование измерений позволяет приближаться к истинному значению физической величины.

Действительное значение физической величины — значение физической величины, найденное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него. Информацию о значении физической величины, получаемую при измерении, называют измерительной информацией. Средство измерений *СИ* представляет измерительную информацию в виде некоторого сигнала (под *сигналом* в общем случае понимают некоторый физический процесс, параметры которого содержат информацию), воспринимаемого человеком или различными техническими устройствами — потребителями измерительной информации. Этот сигнал функционально связан с измеряемой физической величиной, поэтому его называют *сигналом измерительной информации*. В процессе измерения на средство измерений, оператора и объект измерений воздействуют, как правило, различные внешние факторы — влияющие физические величины *ВФВ*.

Влияющей физической величиной называют физическую величину, не являющуюся измеряемой данным средством измерений, но оказывающую влияние на результат измерения этим средством. Несовершенство изготовления средств измерений, неточность их градуировки, действие влияющих физических величин (температура окружающей среды, влажность воздуха, внешние электромагнитные поля, вибрации и т. д.), субъективные ошибки человека-оператора, осуществляющего измерения, и ряд других факторов являются причинами, обуславливающими неизбежное появление погрешности измерения.

Чтобы составить представление о выполненном или предполагаемом измерении, необходимо знать его основные характеристики (принцип измерений, метод измерений и погрешность (иногда точность) измерения).

Принцип измерений — совокупность физических явлений, на которых основано измерение.

Метод измерений — совокупность приемов использования принципов и средств измерений.

Погрешность (или ошибка) измерения — отклонение результата измерения X от истинного значения $X_{И}$ измеряемой величины:

$$\Delta = X - X_{И} \quad (1.3)$$

Погрешность, определяемая формулой (1.3), выражена в единицах

измеряемой величины и называется *абсолютной погрешностью измерения*.

Относительная погрешность измерения — отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = \Delta / X_{И} \quad (1.4)$$

Точность измерения — качество измерения, отражающее близость его результата к истинному значению измеряемой величины. Количественно точность может быть выражена величиной, обратной относительной погрешности, взятой по модулю:

$$\varepsilon = | X_{И} / \Delta | \quad (1.5)$$

При определении абсолютной и относительной погрешностей, а также точности измерения вместо истинного значения физической величины $X_{И}$ реально может быть использовано ее действительное значение $X_{Д}$.

§ 1.2. Классификация измерений

Измерения классифицируют по нескольким признакам, наиболее важные из которых отражены на рис. 1.2.

По первому классификационному признаку измерения подразделяют на: *статические*, при которых измеряемая величина остается постоянной во времени в процессе измерения, и *динамические*, при которых измеряемая величина изменяется в процессе измерения.

Классификация по второму признаку является в большой степени условной, однако широко применяется в измерительной технике. Ею определяются сложившиеся совокупности родственных по природе или применению в отдельных областях науки или техники физических величин.

По третьему признаку измерения подразделяют на три класса.

Измерения максимальной возможной точности, достижимой при современном уровне техники. Это измерения, связанные с созданием и воспроизведением эталонов, а также измерения универсальных физических констант.

Контрольно-поверочные измерения, погрешности которых не должны превышать заданного значения. Такие измерения осуществляются в основном государственными и ведомственными метрологическими службами.

Технические измерения, в которых погрешность результата определяется характеристиками средств измерений. Технические измерения являются наиболее распространенными и выполняются во всех отраслях хозяйства и науки. К ним, в частности, относятся и технологические измерения.

Четвертым классификационным признаком служит число измерений (наблюдений при измерении или просто наблюдений), выполняемых

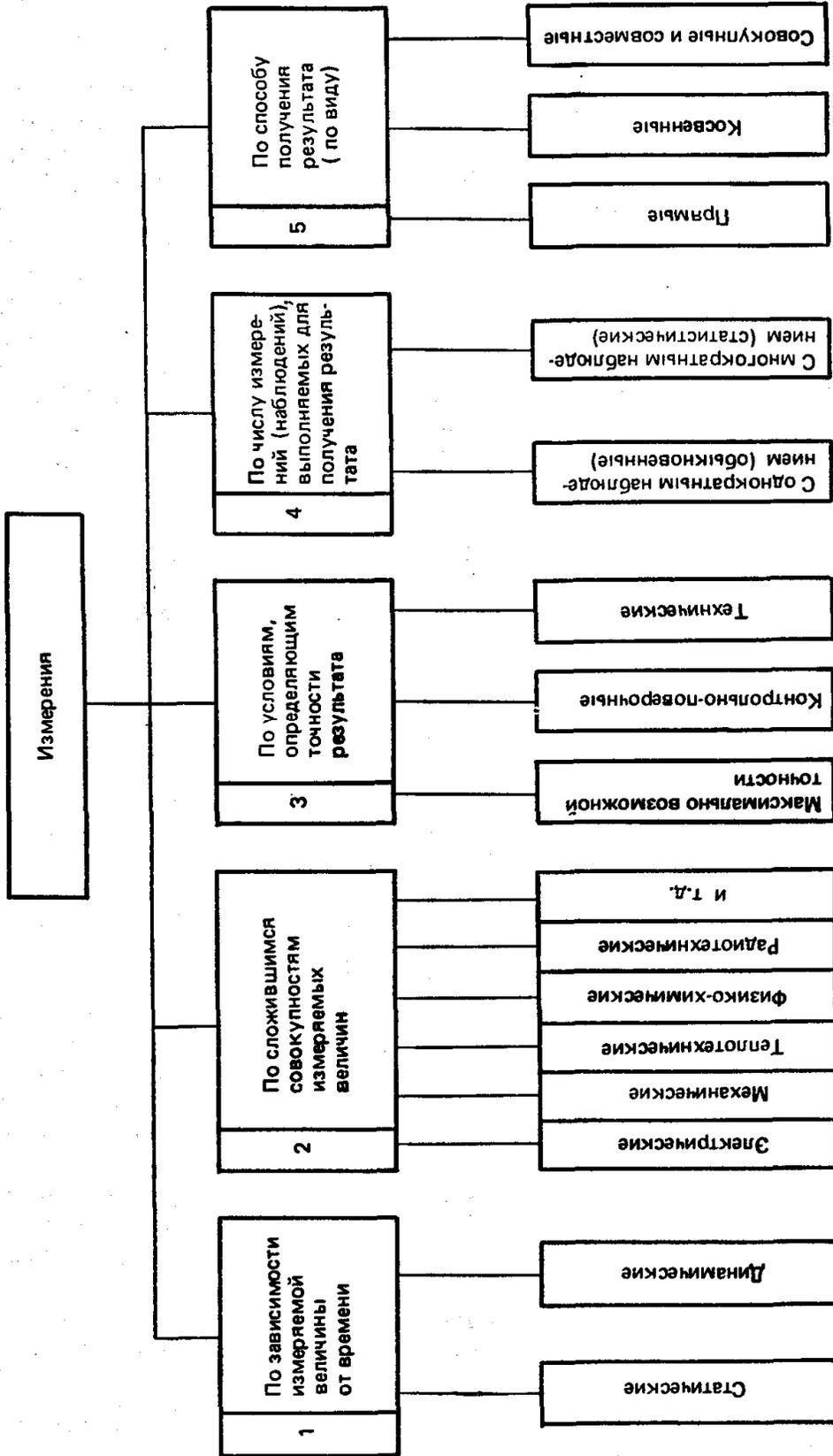


Рис. 1.2. Классификация измерений

для получения результата. Здесь различают *измерения с однократным наблюдением (обыкновенные)* и *измерения с многократными наблюдениями (статистические)*.

Под *наблюдением при измерении* (или просто *наблюдением*) в данном случае в соответствии с действующим государственным стандартом понимают экспериментальную операцию *, выполняемую в процессе измерения, в результате которой получают одно значение из группы значений величины, подлежащих совместной обработке для получения результатов измерения.

По пятому признаку измерения подразделяют в зависимости от вида уравнения измерения, что и определяет способ получения результата. С давних пор в метрологии принято различать прямые, косвенные и совокупные измерения. В настоящее время совокупные измерения разделяют на собственно совокупные и совместные.

Прямыми называют измерения, при которых искомое значение величины находят непосредственно из опытных данных. В процессе прямого измерения объект измерения приводится во взаимодействие со средством измерений и по показаниям последнего отсчитывают значение измеряемой величины или указанные показания умножаются на постоянный коэффициент для определения значения измеряемой величины. Математически прямое измерение можно описать выражением (1.2). Примером прямых измерений могут служить: измерение длины линейкой, массы с помощью весов, температуры стеклянным термометром и т. д. К прямым измерениям относят измерения подавляющего большинства параметров химико-технологических процессов.

Косвенными называют измерения, при которых искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. При косвенных измерениях путем прямых измерений находят значения величин-аргументов, а значение измеряемой величины Y определяют путем вычисления по формуле

$$Y=f(X_1, X_2, \dots, X_m) \quad (1.6)$$

где X_1, X_2, \dots, X_m — величины-аргументы.

Примером косвенных измерений могут служить измерения: плотности однородного тела по его массе и объему, электрического сопротивления по падению напряжения и силе тока и т. д.

Совокупными называют производимые одновременно измерения нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величины находят решением системы уравнений, получаемых при

* Использование понятия «наблюдение» для обозначения экспериментальной операции нельзя признать удачным, так как под наблюдением в русском языке понимается слежение глазами за кем-либо или чем-либо. Понятие «наблюдение» используется только при статистических измерениях, где ранее вместо понятий «наблюдение» и «измерение» использовались более близкие к реальности понятия «измерение» и «серия измерений» соответственно.

значенное для воспроизведения физической величины заданного размера).

Классификационным признаком в таком разделении методов измерений является наличие или отсутствие при измерениях меры.

Для удобства изложения в дальнейшем используется классификация методов измерений, приведенная на рис. 1.3.

Метод непосредственной оценки (отсчета) — метод измерений, в котором значение величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия

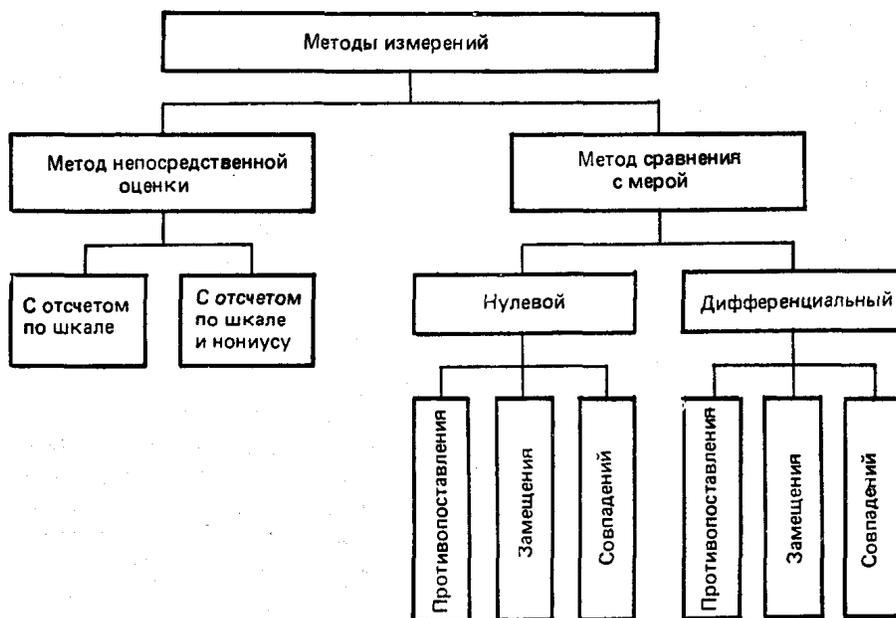


Рис. 1.3. Классификация методов измерений

(прибор прямого действия — измерительный прибор, в котором сигнал измерительной информации движется в одном направлении, а именно с входа на выход).

Метод сравнения с мерой — метод измерения, в котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

Методы сравнения в зависимости от наличия или отсутствия при сравнении разности между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, подразделяют на нулевой и дифференциальный.

Нулевой метод — это метод сравнения с мерой, в котором результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля (прибор сравнения, или компаратор,— измерительный прибор, предназначенный для сравнения измеряемой величины с величиной, значение которой известно).

Дифференциальный метод — это метод сравнения с мерой, в котором на измерительный прибор воздействует разность между измеряемой величиной и известной, воспроизводимой мерой.

Как в нулевом, так и в дифференциальном методе могут быть выделены методы противопоставления, замещения и совпадения.

Метод противопоставления — метод сравнения с мерой, в котором измеряемая величина и величина, воспроизводимая мерой, одновременно воздействуют на прибор сравнения, с помощью которого устанавливается соотношение между этими величинами.

Метод замещения — метод сравнения с мерой, в котором измеряемую величину замещают известной величиной, воспроизводимой мерой.

Метод совпадения — метод сравнения с мерой, в котором разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой, измеряют, используя совпадение отметок шкал или периодических сигналов.

Для пояснения сущности приведенных определений обратимся к примерам реализации методов измерений.

Метод непосредственной оценки с отсчетом показаний по шкале прибора характеризуется тем, что лицу, осуществляющему измерение, не требуется каких-либо вычислений, кроме умножения показаний прибора на некоторую постоянную, соответствующую данному прибору. Примером данного метода измерений может служить

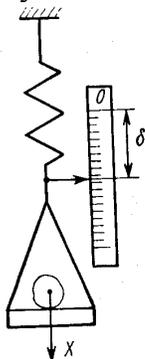


Рис. 1.4. Схема реализации измерений методом непосредственной оценки

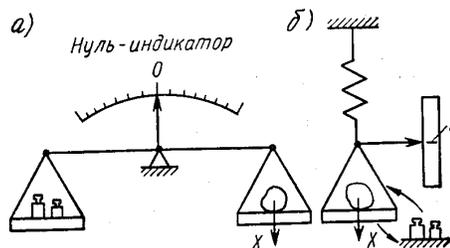


Рис. 1.5. Схемы реализации измерений нулевыми методами сравнения с мерой

взвешивание груза X на пружинных весах (рис. 1.4). Масса груза здесь определяется на основе измерительного преобразования по значению δ деформации пружины.

Процесс измерения по методу непосредственной оценки характеризуется быстротой, что делает его часто незаменимым для практического

использования. Однако точность измерения обычно оказывается невысокой из-за воздействия влияющих величин и необходимости градуировки шкал приборов.

Для точности измерения по методу непосредственной оценки при выполнении некоторых измерений, в частности линейных, применяют метод отсчета по шкале и нониусу (см. рис. 1.3) или верньеру (вспомогательной шкале). Этот метод характеризуется использованием совпадения отметок шкал (основной и вспомогательной).

Нулевой метод измерения характеризуется равенством воздействий, оказываемых измеряемой величиной и мерой, на прибор, используемый для сравнения. В соответствии с классификацией (см. рис. 1.3) различают *нулевые методы противопоставления, замещения и совпадения*. Первые два из этих методов иногда называют соответственно методами *полного противопоставления и полного замещения*.

Примером нулевого метода противопоставления может служить взвешивание груза X на равноплечих весах (рис. 1.5, *a*), когда масса груза определяется массой гирь, уравнивающих воздействие груза на рычаг весов. Состояние равновесия определяется по положению указателя нуль-индикатора, который в этом случае должен находиться на нулевой отметке. Весы при таком измерении выполняют функцию компаратора. Данный метод используется для измерения самых разнообразных физических величин и, как правило, обеспечивает большую точность измерения, чем метод непосредственной оценки, за счет уменьшения влияния на результат измерения погрешностей средства измерений, которое в данном случае осуществляет только сравнение воздействий, создаваемых измеряемой величиной и мерой.

Недостатком данного метода является необходимость иметь большое число мер различных значений для составления сочетаний, воспроизводящих величины, равные измеряемым, т. е. необходимость воспроизводить любое значение известной физической величины без существенного понижения точности. Как правило, это связано с существенными трудностями. Разновидностью рассмотренного метода является *компенсационный метод измерений*, применяемый в тех случаях, когда важно измерить физическую величину, не нарушая процесса, в котором она наблюдается. При подключении измерительного устройства, реализующего компенсационный метод, к объекту измерения на этом устройстве создается действие, направленное навстречу действию, создаваемому изучаемым явлением. При этом создаваемое в измерительном устройстве явление изменяется до тех пор, пока не будет достигнута полная компенсация действия изучаемого явления на измерительное устройство. По размеру физической величины, создающей компенсирующее явление, судят о размере измеряемой физической величины. При условии полной компенсации изучаемое явление протекает в объекте так же, как оно протекает в случае, когда к объекту не подключено измерительное устройство.

Нулевой метод замещения состоит в том, что измеряемая физическая величина и мера последовательно воздействуют на измерительный прибор. При этом значение меры подбирают таким, чтобы ее воздействие на измерительный прибор было равно воздействию измеряемой физической величины. На рис. 1.5, б показан пример реализации метода полного замещения для случая измерения массы груза. Здесь на пружинные весы устанавливают груз X и делают отметку A на шкале как результат его взвешивания. При этом показания пружинных весов принципиально можно и не считывать. Затем снимают груз и на чашку устанавливают такой набор гирь, который обеспечивает такую же деформацию пружины, как и груз X , о чем судят по установке стрелки против отметки A .

Нулевой метод замещения применяется в тех случаях, когда производятся точные измерения параметров, так как он позволяет практически исключить влияние изменений характеристик используемого средства измерений (в рассмотренном случае — изменение характеристик пружины) на результат измерения.

Нулевой метод совпадения состоит в совпадении сигналов двух периодических процессов, характеристика одного из которых измеряется, а другого — используется в качестве меры.

Дифференциальный метод измерений характеризуется тем, что с помощью измерительного прибора методом непосредственной оценки измеряется разность между измеряемой величиной и величиной, воспроизводимой мерой. Этот метод позволяет получить высокоточные результаты даже при использовании для измерения указанной разности относительно грубых средств измерений. Реализация дифференциального метода возможна только при условии наличия высокоточной меры, близкой по значению к измеряемой величине.

Исходя из классификации, приведенной на рис. 1.3, различают *дифференциальные методы противопоставления, замещения и совпадения*.

Первые два из них иногда называют *методами неполного противопоставления и неполного замещения*.

Примером метода неполного противопоставления может служить взвешивание на равноплечих весах, показанных на рис. 1.6, а. Здесь действие груза X уравнивается действием гири, служащей мерой, и силой упругой деформации пружины. По существу в данном случае по величине деформации пружины, значение которой может быть отсчитано по шкале, измеряется разность воздействий груза и гири на пружину. Так определяют разность их масс. Массу же груза определяют после взвешивания как сумму массы гири и показаний, считанных по шкале.

Сущность дифференциального метода замещения можно уяснить, рассмотрев пример (рис. 1.6, б) взвешивания груза X на пружинных весах в том случае, когда из имеющегося набора гирь не удастся составить сочетание, позволяющее добиться такого показания весов, при котором стрелка установится на отметку A , соответствующую

показанию весов при установке на них измеряемого груза X . Предположим, что при установке на весы подобранного набора гирь стрелка весов устанавливается на отметке шкалы B . Когда к подобранному набору добавляются гири с наименьшей массой, стрелка устанавливается на отметке шкалы C . В данном случае замещение получается неполным. Для определения массы

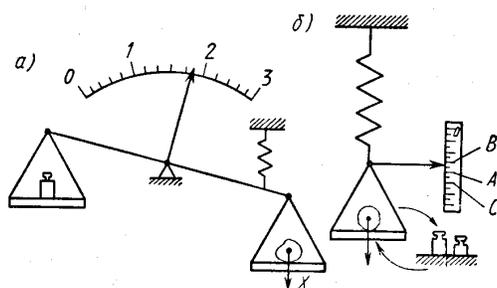


Рис. 1.6. Схемы реализаций измерений дифференциальными методами сравнения с мерой

груза прибегают к интерполяции, с помощью которой по известному значению массы наименьшей гири и числу делений шкалы между отметками B и C рассчитывают значение массы груза и массы подобранного набора гирь, а затем определяют массу груза. Сущность дифференциального метода совпадения состоит в том, что совпадение сигналов двух периодических процессов является неполным. При этом измеряется характеристика периодического процесса, представляющего собой результат взаимодействия названных выше двух периодических процессов. Результат измерения определяется так же, как во всех дифференциальных методах.

§ 1.4. Погрешности измерений

В § 1.1 было показано, что в процессе измерения получают некоторую оценку значения физической величины в принятых единицах, а истинное значение физической величины всегда остается неизвестным, из-за чего нельзя определить истинное значение погрешности измерения. Для приближенной оценки погрешности используют понятие действительного значения физической величины (см. § 1.1), которое находят более точными методами и средствами. Получаемую оценку погрешности, представляющую собой разность A [см. (1.3)] между полученным при измерении и действительным значениями физической величины (здесь и далее имеется в виду абсолютная погрешность), в зависимости от причин возникновения, характера и условий проявления принято выражать сум-

мой двух составляющих, называемых случайной ψ и систематической θ погрешностями измерений:

$$\Delta = q + y \quad (1.8)$$

Классификация погрешностей измерений приведена на рис. 1.7.

Случайная погрешность измерения — составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

Случайная погрешность определяется факторами, проявляющимися нерегулярно с изменяющейся интенсивностью. Значение и знак случайной погрешности определить невозможно, так как в каждом опыте причины, вызывающие погрешность, действуют неодинаково. Случайная погрешность не может быть исключена из результата измерений. Однако проведением ряда повторных измерений и использованием для их обработки методов математической статистики определяют значение измеряемой величины со случайной погрешностью, меньшей, чем для одного измерения.

При организации статистических измерений (см. § 1.2), для которых и определяется случайная погрешность, создаются условия, характеризующиеся тем, что интенсивность всех действующих факторов доводится до некоторого уровня, обеспечивающего более или менее равное влияние на формирование погрешности. В этом случае говорят об *ожидаемой погрешности* (рис. 1.7). Кроме этой погрешности могут иметь место грубые погрешности и промахи.

Грубой погрешностью называют погрешность измерения, существенно превышающую ожидаемую при данных условиях. Причинами грубых погрешностей могут являться неисправность средств измерений, резкое изменение условий измерений и влияющих величин.

Промах — погрешность измерения, которая явно и резко искажает результат. Промах является случайной субъективной ошибкой. Его появление — следствие неправильных действий экспериментатора.

Грубые погрешности и промахи обычно исключаются из экспериментальных данных, подлежащих обработке.

Отдельное значение случайной погрешности предсказать невозможно. Совокупность же случайных погрешностей какого-то измерения одной и той же величины подчиняется определенным закономерностям, которые являются вероятностными. Они описываются в метрологии с помощью методов теории вероятностей и математической статистики. При этом физическую величину, результат измерения которой содержит случайную погрешность, и саму случайную погрешность рассматривают как случайную величину.

Для количественной оценки объективной возможности появления того или иного значения случайной величины служит понятие вероятности, которую выражают в долях единицы (вероятность достоверного события равна 1, а вероятность невозможного события — 0).

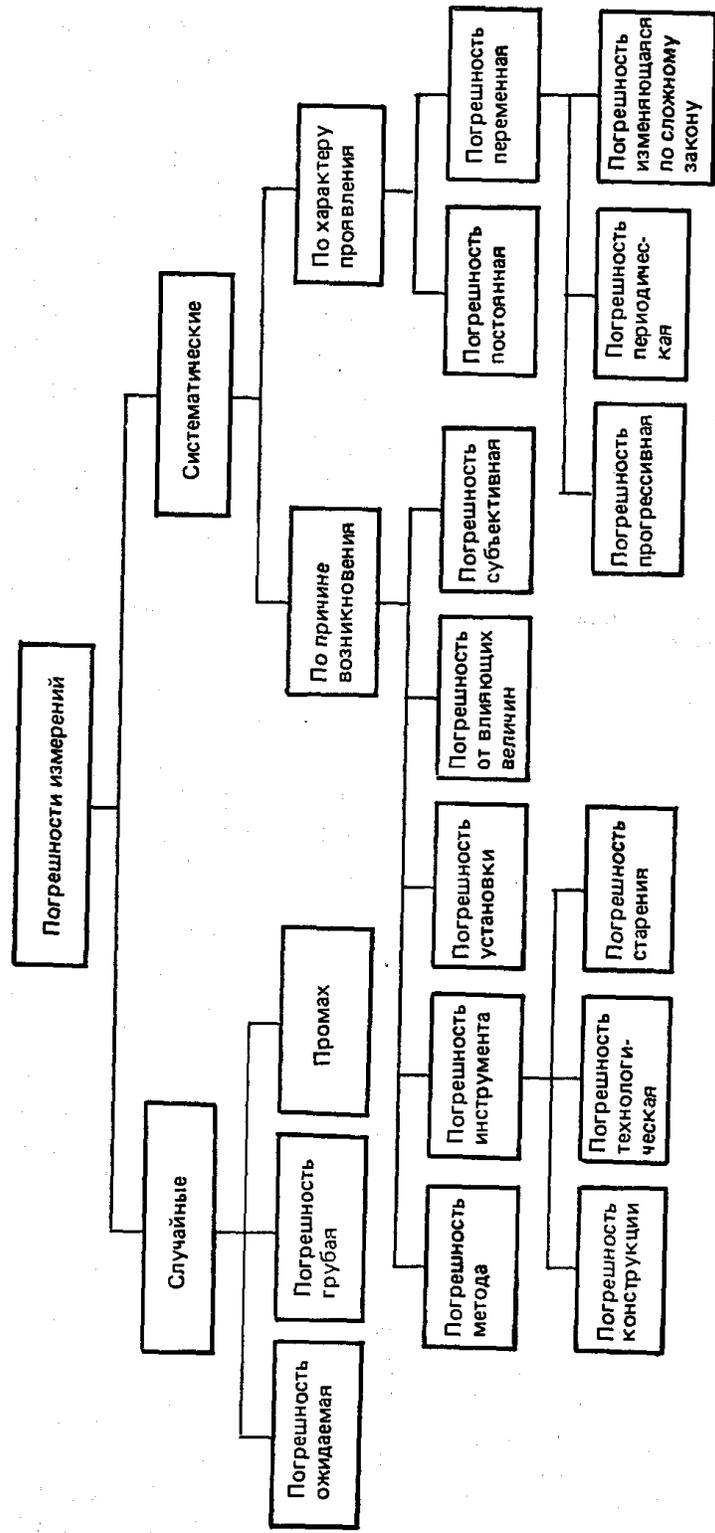


Рис. 1.7. Классификация погрешностей измерений

Математическое описание непрерывных случайных величин осуществляется обычно с помощью *дифференциальных законов распределения случайной величины*. Эти законы определяют связь между возможными значениями случайной величины (погрешности) и соответствующими им плотностями вероятностей (непрерывной считают случайную величину, имеющую бесчисленное множество значений, получить которое можно только при бесконечном числе измерений).

Наиболее распространенным при измерениях является *нормальный закон распределения*. Для некоторой измеряемой величины X кривая 1 распределения плотности вероятности $p(X)$ для закона

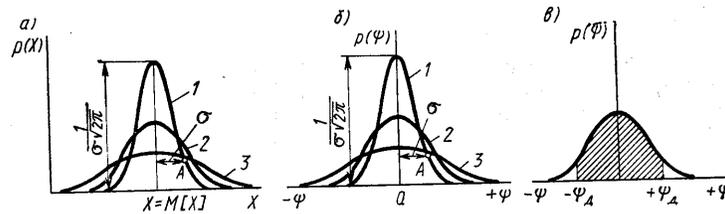


Рис. 1.8. Кривые нормального распределения случайных величин и их случайных погрешностей

нормального распределения имеет вид, показанный на рис. 1.8, а. При этом плотность вероятности (или плотность распределения) характеризует плотность, с которой распределяются значения случайной погрешности в данной точке. Плотность вероятности для закона нормального распределения описывается уравнением

$$p(X) = \frac{1}{s \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X-M[X])^2}{2s^2}} \quad (1.9)$$

где $M[X]$ и σ — характеристики нормального распределения.

Кривую 1 (рис. 1.8, а) можно рассматривать как кривую 1 распределения случайной погрешности (рис. 1.8, б), перенеся начало координат в точку $X=M[X]$. В этом случае плотность вероятности

$$p(\psi) = \frac{1}{s \cdot \sqrt{2\pi}} e^{-0.5(\psi/s)^2} \quad (1.10)$$

где $\psi = X - M[X]$ — случайная погрешность.

Характеристики $M[X]$ и σ называют соответственно математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением. Они являются важными числовыми характеристиками случайной величины. Математическое ожидание является тем значением величины, вокруг которого группируются результаты отдельных наблюдений (см. рис. 1.8), а среднеквадратическое отклонение характеризует

рассеяние результатов отдельных наблюдений относительно математического ожидания, т. е. форму кривой распределения плотности вероятности, площадь под которой всегда равна единице. На рисунке показаны кривые закона нормального распределения (кривые Гаусса) случайной величины X (рис. 1.8, а) и ее случайной погрешности ψ (рис. 1.8, б) при различных значениях среднеквадратического отклонения; рассеяние для кривой 2, больше, чем для кривой 1, а рассеяние для кривой 2—больше, чем для кривой 1.

Геометрически σ определяется как расстояние от оси симметрии нормального распределения до точки A перегиба кривой распределения (рис. 1.8, а, б).

Чтобы определить вероятность P попадания результата измерения или случайной погрешности в некоторый наперед заданный интервал от $-\psi_d$ до $+\psi_d$ (рис. 1.8, с), необходимо найти площадь под кривой распределения, ограниченную вертикалями на границе интервала. Для нормального распределения

$$p(y) = \frac{1}{s \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\psi_d}^{+\psi_d} e^{-0.5(y/s)^2} dy \quad (1.11)$$

Решить интеграл (1.11) аналитически невозможно. Обычно он приводится в виде таблиц, позволяющих определить его значение приближенно в долях единицы. Чаще решается обратная задача, состоящая в определении доверительного интервала.

Доверительным интервалом с границами (или доверительными границами от $-\psi_d$ до $+\psi_d$, рис. 1.8, в) называют интервал, который с заданной вероятностью P_d , называемой *доверительной*, накрывает истинное значение измеряемой величины.

Наиболее часто применяемым в практике обработки результатом измерений для нормального закона распределения является значение доверительной вероятности для значений доверительного интервала, равных $\frac{2}{3}s, 2s$ и $3s$. Значения доверительных вероятностей для них соответственно равны 0,500; 0,950; 0,997. Физически это означает, что появление случайных погрешностей за пределами $\pm \frac{2}{3}s$ интервала $\pm \frac{2}{3}s$ равновероятно, т. е. составляет 50 % вероятности появления случайных погрешностей, меньших по значениям $\frac{2}{3}s$, и 50 % — больших $\frac{2}{3}s$. При интервалах, равных $\pm 2\sigma$ и $\pm 3\sigma$, вероятность появления случайных погрешностей, больших 2σ и 3σ , составляет соответственно 5 и 0,3 %.

Часто встречающимся в измерительной практике законом распределения случайной погрешности является *равномерный закон* (рис. 1.9, а), когда непрерывная случайная величина имеет воз-

возможные значения в пределах некоторого конечного интервала, причем в пределах этого интервала все значения случайной величины обладают одной и той же плотностью вероятности:

$$p(y) = \begin{cases} 0 & \text{при } -\infty < y < -a \\ \frac{1}{2a} & \text{при } -a < y < +a \\ 0 & \text{при } +a < y < +\infty \end{cases} \quad (1.12)$$

Примером равномерного распределения погрешности может служить погрешность от трения в приборах с механическими подвижными элементами.

Графическая интерпретация закона распределения, называемого *двухмодальным*, показана на рис. 1.9, б. В соответствии с этим за-

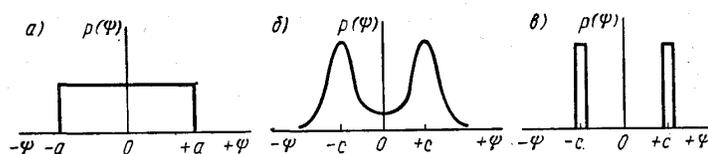


Рис. 1.9. Виды дифференциальных законов распределения случайной погрешности

коном малые случайные погрешности встречаются реже, чем большие. Середина кривой распределения плотности вероятности оказывается прогнутой вниз. В пределе такое двухмодальное распределение может превратиться в распределение, показанное на рис. 1.9, в, когда единственно наблюдаемыми погрешностями будут погрешности $\pm c$. Такое распределение называют дискретным. Двухмодальное распределение обычно представляют как композицию дискретного и нормального распределений со среднеквадратическим отклонением σ_M и аналитически описывается выражением

$$p(y) = \frac{1}{2s_M \cdot \sqrt{2p}} \cdot \left[e^{-\frac{(y-c)^2}{2s_M^2}} + e^{-\frac{(y+c)^2}{2s_M^2}} \right] \quad (1.13)$$

Появление двухмодального распределения обычно вызвано явлениями люфта и гистерезиса в кинематических цепях средств измерений.

Систематическая погрешность — составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины (см. рис. 1.7).

Выявление и оценка систематических погрешностей являются наиболее трудным моментом любого измерения и часто связаны с необходимостью проведения исследований. Обнаруженная и оцененная систематическая погрешность исключается из результата

введением поправки. В зависимости от причины возникновения различают следующие систематические погрешности.

Погрешность метода (теоретическая погрешность) измерений — составляющая погрешности измерения, обусловленная несовершенством метода измерений. Здесь необходимо учитывать тот факт, что метод измерения, по определению, включает в себя и принцип измерения. Рассматриваемая погрешность определяется в основном несовершенством принципа измерения и, в частности, недостаточной изученностью явления, положенного в основу измерения.

Инструментальная погрешность измерения — составляющая погрешность измерения, зависящая от погрешности применяемых средств измерений. Данная погрешность имеет несколько составляющих, наиболее важные из которых определяются несовершенством конструкции (или схемы), технологии изготовления средств измерений, постепенным их износом и старением материалов, из которых эти средства измерений изготовлены.

Погрешность установки является следствием неправильности установки средств измерений.

Погрешность от влияющих величин является следствием воздействия на объект и средством измерений внешних факторов (тепловых и воздушных потоков, магнитных, электрических, гравитационных и других полей, атмосферного давления, влажности воздуха, ионизирующего излучения).

Субъективная погрешность обусловлена индивидуальными свойствами человека, выполняющего измерения. Причиной ее являются укоренившиеся неправильные навыки выполнения измерений. К этой систематической погрешности относятся, например, погрешность из-за неправильного отсчитывания десятых долей делений шкалы прибора, погрешности из-за различной для различных людей скорости реакции и т. п.

По характеру проявления систематические погрешности подразделяют на постоянные и переменные (см. рис. 1.7).

Постоянные погрешности не изменяют своего значения при повторных измерениях. Причинами этих погрешностей являются: неправильная градуировка или юстировка средств измерений, неправильная установка начала отсчета и т. д.

Переменные погрешности при повторных измерениях могут принимать различные значения. Если переменная погрешность при повторных измерениях возрастает или убывает, то ее называют *прогрессивной*. Переменная погрешность может изменяться при повторных измерениях периодически или по сложному закону.

Причинами возникновения переменной систематической погрешности являются: действие внешних факторов и особенности конструкций средств измерений.

Погрешности, приведенные на рис. 1.7, могут иметь место как при статических, так и при динамических измерениях (см. § 1.2). Погрешности, возникающие при этих измерениях, принято называть соответственно *статическими* или *динамическими*.

ГЛАВА 2 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СРЕДСТВАХ ИЗМЕРЕНИЙ

§ 2.1. Классификация средств измерений

В метрологии средства измерений принято классифицировать по виду, принципу действия и метрологическому назначению.

Различают следующие *виды средств измерений*: меры, измерительные устройства; измерительные установки и измерительные системы (рис. 2.1).

Мера — средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера.

Самым многочисленным видом средств измерений являются измерительные устройства, применяемые самостоятельно или в составе измерительных установок и измерительных систем.

В зависимости от формы представления сигнала измерительной информации измерительные устройства подразделяют на измерительные приборы и измерительные преобразователи.

Измерительный прибор — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительная информация обычно представляется в виде перемещения указателя по шкале, перемещения пера по диаграмме или в виде цифр, появляющихся на табло.

Измерительные приборы могут быть классифицированы по ряду признаков. Наиболее важные с позиции метрологии признаки отражены на рис. 2.1.

Измерительный преобразователь — средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающийся непосредственному восприятию наблюдателем.

Измерительная информация представляется преобразователями обычно в виде сигналов постоянного или переменного тока или напряжения, давления сжатого воздуха или жидкости, частоты гармонических колебаний, последовательности прямоугольных импульсов и т. п.

Как видно из рис. 2.1, измерительные преобразователи могут быть классифицированы в зависимости от используемого метода измерения и способа представления величины совершенно аналогично измерительным приборам. Кроме того, принято различать измерительные преобразователи по расположению в измерительной

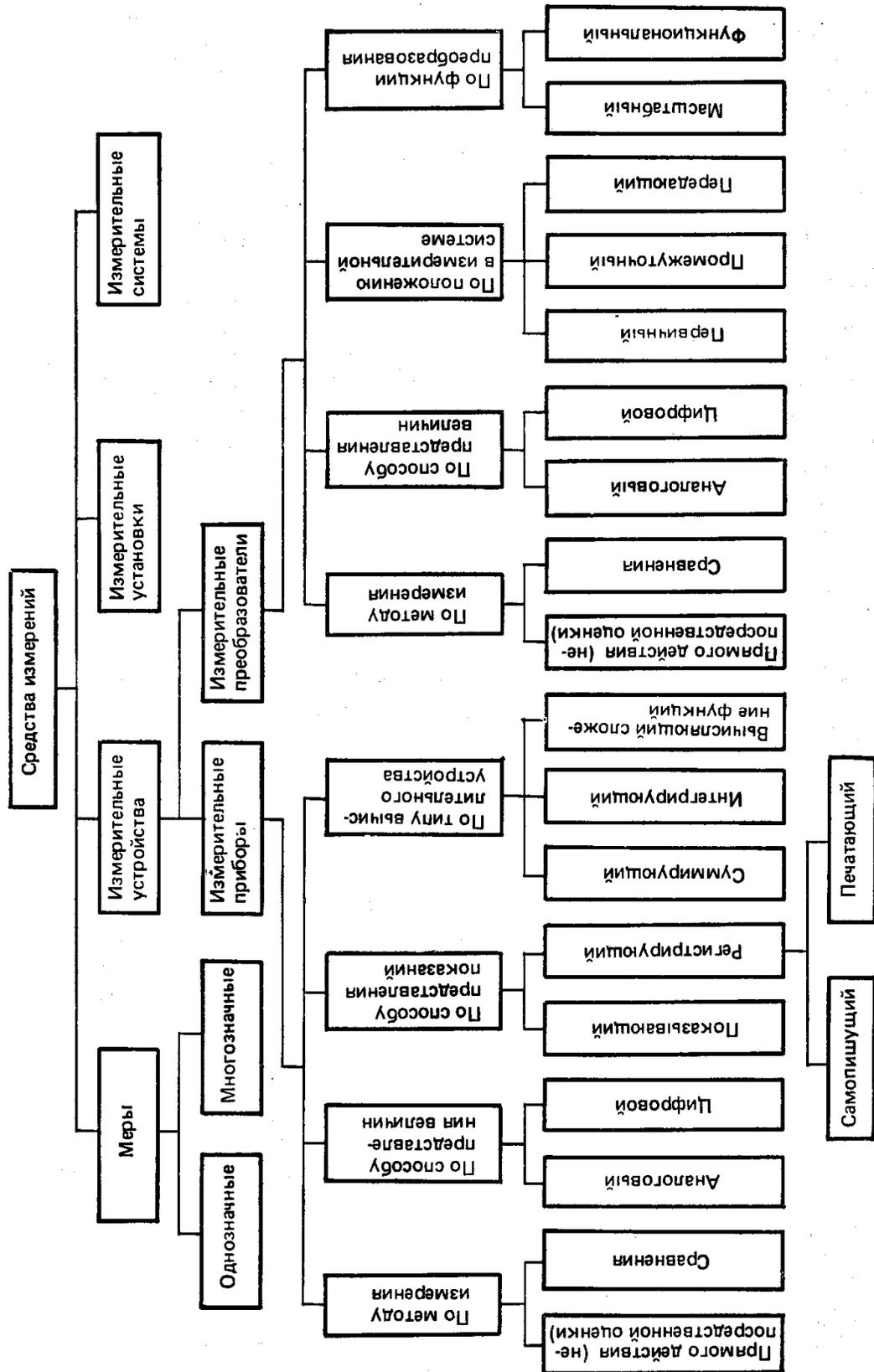


Рис. 2.1. Классификация средств измерений

системе и виду функции преобразования, представляющей собой зависимость сигнала измерительного преобразователя от измеряемой физической величины. В приложении 1 дополнительно к рассмотренным приведены термины и понятия, использованные на рис. 2.1. Помимо приведенной на рис. 2.1 классификации измерительных приборов и преобразователей используют и другие.

По роду измеряемой величины измерительные устройства подразделяют на амперметры — для измерения тока, термометры — для измерения температуры, манометры — для измерения давления, концентраторы — для измерения концентрации веществ и т. п. По степени защиты измерительные устройства бывают в нормальном (обыкновенном), пыле-, водо-, взрывозащищенном, герметичном и т. д. исполнении.

Измерительные приборы подразделяют по характеру применения на стационарные (щитовые), корпус которых приспособлен для жесткого крепления на месте установки, и переносные, корпус которых не предназначен для жесткого крепления.

Измерительная установка — совокупность функционально объединенных средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, предназначенных для выработки сигналов измерительной информации в форме, удобной для непосредственного восприятия наблюдателем, и расположенных в одном месте. Измерительные установки обычно используются в научных исследованиях, осуществляемых в различных лабораториях, при контроле качества и в метрологических службах для определения метрологических свойств средств измерений.

Измерительная система — совокупность средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки сигнала измерительной информации в форме, удобной для автоматической обработки, передачи и (или) использования в автоматических системах управления. В настоящее время измерительные системы часто рассматриваются как один из классов так называемых информационно-измерительных систем.

Информационно-измерительная система (ИИС) — совокупность функционально объединенных измерительных, вычислительных и других вспомогательных технических средств, служащая либо для получения измерительной информации, ее преобразования, обработки в целях представления потребителю (в том числе ввода в АСУ) в требуемом виде, либо для автоматического осуществления логических функций контроля, диагностики, идентификации (см. приложение 1).

Кроме рассмотренной классификации средств измерений *по виду* существенной является классификация *по принципу действия*.

Принципом действия средства измерений называют физический принцип, положенный в основу построения средств измерения дан-

ного вида. Принцип действия обычно находит отражение в названии средства измерений, например: термоэлектрический термометр, деформационный манометр, электромагнитный расходомер и т. п.

В силу того что для средств измерений различных величин классификация по принципу действия является специфичной, при дальнейшем изложении она будет приводиться для каждой величины.

И наконец, существенной с позиций метрологии является классификация средств измерений *по метрологическому назначению*, в соответствии с которой принято различать образцовые и рабочие средства измерений.

Рабочее средство измерений — средство, применяемое для измерений, не связанных с передачей размера единиц. Рабочие средства измерений — это все громадное многообразие измерительных приборов, преобразователей, измерительных установок и систем, применяемых во всех областях деятельности человека.

Образцовое средство измерений — мера, измерительный прибор, измерительный преобразователь, служащее для поверки (см. гл. 15) по нему других (как рабочих, так и образцовых меньшей точности) средств измерений и утвержденное в качестве образцового.

§ 2.2. Структурные схемы измерительных устройств

Для удобства анализа различных соединений измерительных устройств между собой и со средствами автоматического управления любое измерительное устройство принято рассматривать как некоторый преобразователь, служащий для преобразования входного сигнала X в выходной Y . Такое представление измерительных устройств позволяет применять при анализе систем хорошо разработанный аппарат теории автоматического регулирования.

Если входной и выходной сигналы представляют собой некоторые физические процессы, характеризуемые несколькими параметрами, то среди них различают информативные и неинформативные (см. приложение 1).

Для конструкторов-приборостроителей чрезвычайно важной является информация о внутренней структуре измерительных устройств. Измерительные устройства состоят из некоторого числа элементов (составных частей), предназначенных для выполнения определенных функций, таких, как: преобразование поступающего сигнала по форме или виду энергии, успокоение колебаний, защита от помехонесущих полей, коммутация цепей, представление информации и т. п. К элементам измерительных устройств относятся: опоры, направляющие, пружины, магниты, контакты, множительно-передаточные механизмы и т. п.

Основные составные части измерительных устройств:

преобразовательный элемент — элемент средства измерений, в котором происходит одно из ряда последовательных преобразований величины;

измерительная цепь — совокупность преобразовательных элементов средства измерений, обеспечивающая осуществление всех преобразований сигнала измерительной информации;

чувствительный элемент — первый в измерительной цепи преобразовательный элемент, находящийся под непосредственным воздействием измеряемой величины;

измерительный механизм — часть конструкции средств измерений, состоящая из элементов, взаимодействие которых вызывает их взаимное перемещение;

отсчетное устройство — часть конструкции средства измерений, предназначенная для отсчитывания значений измеряемой величины;

регистрирующее устройство — часть регистрирующего измерительного прибора, предназначенная для регистрации показаний.

На рис. 2.2 приведены структурные схемы измерительных устройств прямого действия (рис. 2.2, а, в) и сравнения (рис. 2.2, б, г)! Первые часто называют *измерительными устройствами прямого преобразования*, а вторые — *измерительными устройствами уравнивающего, или компенсационного, преобразования*.

Структурная схема измерительных устройств однозначно определяется используемым методом преобразования.

Измерительный прибор, основанный на методе прямого преобразования (рис. 2.2, а), работает следующим образом. Измеряемая физическая величина X поступает в чувствительный элемент 1, где

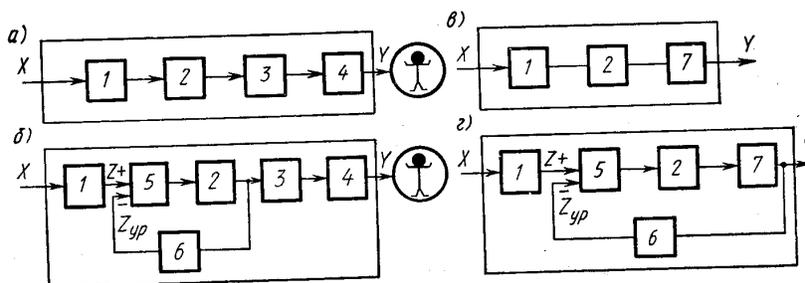


Рис. 2.2. Структурные схемы измерительных устройств

преобразуется в другую физическую величину, удобную для дальнейшего использования (например, ток, напряжение, давление, перемещение, сила), и поступает на промежуточный преобразовательный элемент 2, который обычно либо усиливает поступающий сигнал, либо преобразует его по форме. (В частном случае элемент 2 может отсутствовать.) Выходной сигнал элемента 2 поступает к измерительному механизму 3, перемещение элементов которого определяется с помощью отсчетного устройства 4. Выходной сигнал Y (показание), формируемый измерительным прибором, может быть воспринят органами чувств человека.

Показанием называют значение величины, определяемое по отсчетному устройству и выраженное в принятых единицах этой величины. Отсчетное устройство представляет собой цифровое табло или, в подавляющем большинстве случаев, шкалу с указателем. Для шкальных отсчетных устройств принято использовать ряд понятий, сущность большинства из которых легко установить по рис. 2.3.

Схема измерительного прибора, основанного на методе уравновешивающего преобразования, показана на рис. 2.2, б. Отличительной особенностью таких приборов является наличие отрицательной

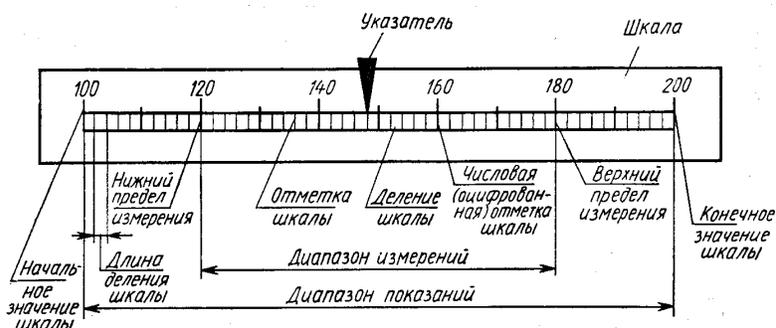


Рис. 2.3. Схема отсчетного устройства измерительного прибора

обратной связи. Здесь сигнал Z , возникающий на выходе чувствительного элемента, поступает на преобразовательный элемент 5, который способен осуществлять сравнение двух величин (элемент сравнения, компарирующий элемент), поступающих на его вход. Кроме величины Z на выход элемента 5 подается с противоположным знаком величина $Z_{ур}$ (уравновешивающий сигнал), которая формируется на выходе обратного преобразовательного элемента 6. На выходе элемента 5 формируется сигнал, пропорциональный разности значений величин Z и $Z_{ур}$. Этот сигнал поступает в промежуточный преобразовательный элемент 2, выходной сигнал которого поступает одновременно на измерительный механизм 3 и на вход обратного преобразовательного элемента 6. В зависимости от типа промежуточного преобразовательного элемента 2 при каждом значении измеряемого параметра и соответствующем ему значении Z разность $Z - Z_{ур}$, поступающая на вход элемента 5, может сводиться к нулю или иметь некоторое малое значение, пропорциональное измеряемой величине.

На рис. 2.2, в, г приведены структурные схемы измерительных преобразователей, основанных соответственно на методах прямого и уравновешивающего преобразователя. В этих схемах отсутствует Измерительный механизм и отсчетное устройство. Этим определяется

тот факт, что сигнал измерительных преобразователей имеет форму, недоступную для восприятия человеком. В то же время в составе измерительных преобразователей, как правило, имеется окончательный преобразовательный элемент 7, который формирует выходной сигнал (усиливает его по мощности, преобразует в частоту колебаний и т. д.) таким образом, что его можно передавать на расстояние, хранить и обрабатывать.

§ 2.3. Статические характеристики и параметры измерительных устройств

В общем случае состояние (режим работы) измерительного устройства, при котором значения входного X и выходного Y сигналов не изменяются, называют статическими (стационарными или равновесными).

Статической характеристикой измерительного устройства называют функциональную зависимость выходного сигнала от входного в статическом режиме работы указанного устройства. Более точно статическую характеристику можно определить как зависимость информативного параметра выходного сигнала от информативного параметра его входного сигнала в статическом режиме. Статическая характеристика описывается в общем случае некоторым нелинейным уравнением (уравнением преобразования):

$$Y = f(X) \quad (2.1)$$

Для измерительных преобразователей, а также измерительных приборов с неименованной шкалой или со шкалой, отградуированной в единицах, отличных от единиц измеряемой величины, статическую характеристику принято называть *функцией преобразования*. Для измерительных приборов иногда статическую характеристику называют *характеристикой шкалы*.

Определение статической характеристики связано с выполнением градуировки, поэтому для всех средств измерений используют понятие *градуировочной характеристики*, под которым понимают зависимость между значениями величин на выходе и входе средства измерений, составленную в виде таблицы, графика или формулы.

На рис. 2.4 показаны виды статических характеристик измерительных устройств. За исключением специальных случаев, основное требование, предъявляемое к статической характеристике измерительных устройств, сводится к получению линейной зависимости между выходной и входной величинами. На практике это требование реализуется в общем случае только с некоторой принятой заранее погрешностью.

Кроме статической характеристики для определения метрологических свойств измерительных устройств используется ряд параметров.

На рис. 2.4 на статической характеристике / графически представлены упомянутые понятия диапазона показаний, диапазона измерений нижнего X_H , Y_H и верхнего X_B , Y_B пределов измерений (см. также рис. 2.3).

Диапазон показаний — область значений шкалы, ограниченная конечным и начальным значениями шкалы.

Диапазон измерений (рабочая часть шкалы.) — область значений измеряемой величины (на шкале прибора), для которой нормированы допускаемые погрешности средств измерений (см. §2.6).

В частном случае указанные диапазоны могут совпадать.

Применительно к измерительным устройствам вообще диапазон измерений часто называют *рабочим диапазоном преобразований*. *Верхний предел измерений* — наибольшее значение диапазона измерений.

Нижний предел измерений — наименьшее значение диапазона измерений.

Из сказанного следует, что диапазон измерений определяется разностью значений верхнего и нижнего пределов измерений

($X_B - X_H$, $Y_B - Y_H$). Для количественной оценки влияния на выходной сигнал измерительного устройства входного сигнала в произвольной точке (рис. 2.4) статической характеристики служит предел отношения приращения ΔY выходного сигнала к приращению ΔX входного сигнала, когда последнее стремится к нулю, т. е. производная в выбранной точке

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{dY}{dX} \quad (2.2)$$

Применительно к измерительным приборам этот параметр называют *чувствительностью* и определяют как отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины. Графически она определяется тангенсом угла наклона а касательной (рис. 2.4), проведенной к выбранной точке A статической характеристики.

Если статическая характеристика измерительного прибора нелинейна (кривая 1 на рис. 2.4), то его чувствительность будет различной в разных точках характеристики, а шкала прибора — неравномерной. Приборы с линейной (прямая 2 на рис. 2.4) или пропорциональной (прямая 3 на рис. 2.4) статической характеристикой

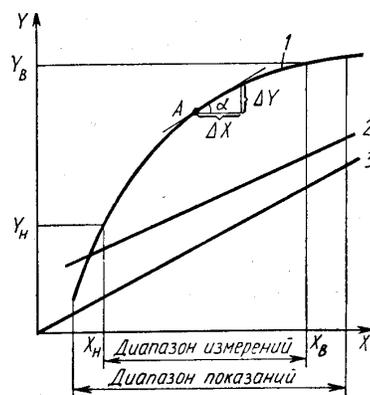


Рис. 2.4. Статическая характеристика измерительного устройства

имеют неизменную в любой точке шкалы чувствительность и равномерную шкалу.

У измерительных преобразователей статическая характеристика, как правило, является линейной:

$$Y = KX \quad (2.3)$$

Здесь K — *коэффициент преобразования* (или при использовании преобразователя в системах автоматического регулирования — *коэффициент передачи*), определяемый как отношение сигнала на выходе измерительного преобразователя, отражающего измеряемую величину, к вызывающему его сигналу на входе преобразователя. Для измерительных приборов важным параметром является *цена деления*, определяемая как разность значений величин, соответствующих двум соседним отметкам шкалы. Физически цена деления определяется количеством единиц входной величины, содержащихся в одном делении шкалы измерительного прибора.

Цена деления однозначно связана с числом делений n шкалы измерительного прибора. Последнее в свою очередь связано с погрешностью измерительного прибора, обычно представляемой его классом точности Λ (см. § 2.6). Число делений шкалы измерительного прибора, как правило, в первом приближении определяется из соотношения

$$n \geq \frac{10}{2\Lambda} \quad (2.4)$$

При выполнении условия (2.4) число делений шкалы выбирают таким, чтобы цена деления составляла целое число единиц измеряемой величины.

В научно-технической литературе используется понятие *порога чувствительности* (*порога реагирования*) измерительного устройства, под которым понимают то наименьшее изменение входного сигнала, которое вызывает уверенно фиксируемое изменение выходного сигнала.

Как правило, наблюдатель, осуществляющий измерение, уверенно может заметить смещение стрелки на половину деления шкалы, поэтому порог чувствительности можно считать равным половине цены деления, а если учесть при этом соотношение (2.4), то в первом приближении порог чувствительности равен классу точности Λ .

Одним из важнейших условий получения корректных результатов измерений является учет взаимодействия измерительных устройств между собой и с объектом измерений.

При подключении измерительного устройства или преобразователя к объекту измерений последний потребляет некоторую энергию или мощность от объекта. Аналогичная ситуация имеет место при подключении измерительного прибора или преобразователя к выходу предыдущего по цепи измерения преобразователя. Это определяет необходимость учитывать свойства измерительных устройств

отбирать или отдавать энергию через свои входные или выходные цепи.

В качестве характеристики указанного свойства принято использовать для измерительных устройств понятие *входного импеданса* (полного или кажущегося сопротивления), а для измерительных преобразователей — понятия *входного* и *выходного импедансов*. В общем случае под импедансом Z понимают отношение обобщенной силы N к обусловленной ею обобщенной скорости W :

$$Z = \frac{N}{W} \quad (2.5)$$

В настоящее время понятие входного и выходного импедансов широко используется для электрических измерительных устройств. При этом импеданс определяется как отношение напряжения к току. Применительно к измерительным устройствам для неэлектрических величин в каждом отдельном случае требуется проведение исследований для установления наиболее целесообразной формы представления входного и выходного импедансов.

§ 2.4. Динамические характеристики измерительных устройств

Режим работы измерительного устройства, при котором значения выходного и входного сигналов изменяются во времени, называют динамическим (нестационарным или неравновесным).

Практически все измерительные устройства имеют в своем составе инерционные элементы, а именно: подвижные механические узлы, электрические или пневматические емкости, индуктивности, элементы, обладающие тепловой инерцией и т. п. Наличие инерционных элементов определяет инерционность всего измерительного устройства, т. е. приводит к тому, что в динамическом режиме мгновенное значение выходного сигнала измерительного устройства зависит не только от мгновенного значения входного сигнала, но и от любых изменений этого сигнала, т. е. от его первой и второй производных и производных более высокого порядка.

Указанные инерционные свойства измерительных устройств определяют динамической характеристикой.

Динамическая характеристика измерительного устройства в общем случае это зависимость между информативными параметрами выходного и входного сигналов и временем или зависимость выходного сигнала от входного в динамическом режиме.

Динамическую характеристику измерительного устройства принято описывать дифференциальным уравнением, передаточной или комплексной частотной функциями.

В подавляющем большинстве случаев динамическая характеристика измерительных устройств в линейной части статической характеристики (для измерительных устройств с линейной статической

характеристикой во всем диапазоне преобразований) может быть описана дифференциальным уравнением вида

$$a_n \cdot \frac{d^n Y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} Y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \cdot \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = KX(t) \quad (2.6)$$

или соответствующей *передаточной функцией*

$$W(p) = \frac{K}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + 1} \quad (2.7)$$

либо

$$Y(p) = W(p) / X(p) \quad (2.8)$$

где $Y(t)$ и $X(t)$ —выходной и входной сигналы измерительного устройства как функции времени; n — число, определяющее порядок производной.

Передаточную функцию $W(p)$ [см. (2.8)] можно рассматривать как коэффициент преобразования измерительного устройства в динамическом режиме.

Передаточная функция, как и дифференциальное уравнение, является исчерпывающей характеристикой инерционных свойств измерительного устройства. Она позволяет определять реакцию измерительного устройства на входные сигналы, изменяющиеся во времени по любому закону.

Передаточную функцию измерительных устройств удобно использовать при анализе работы последних в автоматических системах регулирования. Ее определяют обычно через *переходную* или *временную характеристику*, которая определяется как изменение во времени выходного сигнала $h(t)$ измерительного устройства при подаче на его вход скачкообразного сигнала, равного по значению единице входной величины.

Если высота скачкообразного входного сигнала не равна единице, а имеет некоторое значение X_A , то по переходной характеристике можно определить выходной сигнал, используя выражение

$$Y(t) = h(t)X_A \quad (2.9)$$

Для определения инерционных свойств измерительных устройств по переходным характеристикам обычно используют заимствованное из теории автоматического регулирования понятие динамического звена. Переходные характеристики и передаточные функций типовых динамических звеньев известны, что позволяет по форме переходной характеристики измерительного устройства отождествить его с каким-либо типовым динамическим звеном, а следовательно, определить форму передаточной функции испытываемого измерительного устройства. Описанную процедуру принято называть идентификацией.

На рис. 2.5 показаны наиболее типичные для измерительных устройств формы переходных характеристик, т. е. кривые переходных процессов, или *кривые разгона*.

Для их получения в нулевой (для простоты) момент времени входной сигнал измерительного устройства скачком изменяется на X_A от некоторого значения X_1 до X_2 (рис. 2.5, а). По окончании переходного процесса выходной сигнал измерительного устройства изменяется на Y_A от значения Y_1 до Y_2 .

Для определения коэффициента преобразования K измерительного устройства достаточно вычислить отношение Y_A/X_A .

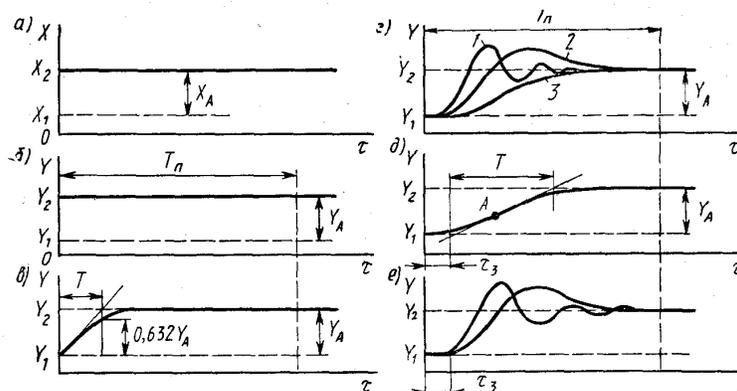


Рис. 2.5. Типичные для измерительных устройств формы переходных процессов

Переходные процессы, показанные на рис. 2.5, б, в, г, соответствуют типовым усилительному (безынерционному), апериодическому первого порядка и колебательному звеньям.

Процесс, представленный на рис. 2.5, б, характерен для электронных измерительных устройств, а процессы, представленные на рис. 2.5, в, г,— для большого числа измерительных устройств, основанных на прямом преобразовании. Кривая на рис. 2.5, в представляет собой экспоненту, а величина T (подкасательная) называется *постоянной времени*. Она определяет собой время, за которое выходной сигнал достиг бы нового установившегося значения, если бы изменялся с постоянной скоростью, равной скорости в момент скачкообразного изменения входного сигнала.

Постоянная времени используется для характеристики динамических свойств измерительных устройств. Проведение касательной и кривой переходного процесса сопряжено с погрешностями, поэтому значения постоянной времени определяют как интервал времени, за который выходной сигнал изменяется на 0,632 от своего приращения Y_A (рис. 2.5, в). Корректность такого определения легко доказывается математически.

Колебательное динамическое звено, а следовательно, и измерительное устройство, в котором имеет место переходный процесс (рис. 2.5, г), можно рассматривать как соединение двух апериодических

звеньев с постоянными времени T_1 и T_2 . При этом в зависимости от соотношений T_1 и T_2 переходный процесс будет различен. Если $(T_1/T_2) < 2$, то он имеет форму кривых 1 и 2, а при $(T_1/T_2) \geq 2$ — форму кривой 3 (рис. 2.5, з).

Переходные процессы, показанные на рис. 2.5, д, е, характерны для случаев, когда дифференциальное уравнение, описывающее динамику измерительного устройства, имеет порядок более чем второй. В этих случаях принято рассматривать измерительные устройства как совокупность нескольких, соединенных последовательно типовых динамических звеньев. Например, измерительное устройство с переходным процессом, показанным на рис. 2.5, д, можно рассматривать как соединение звена чистого запаздывания со временем запаздывания t_3 и апериодического звена с постоянной времени T (для графического определения значений t_3 и T достаточно провести касательную к точке перегиба A на рис. 2.5, д). Измерительное устройство с переходным процессом, показанным на рис. 2.5, е, можно рассматривать как соединение звена чистого запаздывания и колебательного звена.

Для всех измерительных устройств важным является время установления выходного сигнала (или показаний) T_{II} (рис. 2.5), которое

Таблица 2.1

Типичные дифференциальные уравнения и передаточные функции измерительных устройств

Кривая переходного процесса	Дифференциальное уравнение	Передаточная функция
Рис. 2.5, б	$Y(t) = K(t)$	K
Рис. 2.5, в	$T \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = KX(t)$	$\frac{K}{Tp + 1}$
Рис. 2.5, г	$T_2^2 \frac{d^2Y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = KX(t)$	$\frac{K}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$
Рис. 2.5, д	$T \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = KX(t - t_3)$	$\frac{K}{Tp + 1} e^{-t_3 p}$
Рис. 2.5, е	$T_2^2 \frac{d^2Y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = KX(t - t_3)$	$\frac{K}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1} e^{-t_3 p}$

также называют временем реакции. Оно определяет собой отрезок времени, необходимый для завершения переходного процесса при скачкообразном изменении входного сигнала. Так как в основном все рассмотренные переходные процессы (рис. 2.5) теоретически заканчиваются только при бесконечном значении времени, то за время реакции T_r , обычно принимают время, за которое выходной сигнал измерительного устройства, приближаясь к новому установившемуся значению, входит в некоторую зону, отличающуюся от этого значения на $\pm 5\%$ от изменения выходного сигнала, соответствующего данному скачкообразному входному сигналу.

Значение времени реакции может быть приближенно определено через постоянную времени измерительного устройства из соотношения

$$T_r = (3 \div 5)T \quad (2.10)$$

Дифференциальные уравнения и передаточные функции рассмотренных наиболее типичных по инерционным свойствам измерительных устройств приведены в табл. 2.1.

§ 2.5. Погрешности измерительных устройств

Инструментальная (см. рис. 1.7) погрешность (или погрешность измерительных устройств) имеет определяющее значение для наиболее распространенных технических измерений.

На рис. 2.6 приведена классификация погрешностей измерительных устройств по ряду признаков.

По характеру проявления при повторных измерениях одного и того же значения физической величины принято выделять систематическую и случайную погрешности (или составляющие погрешности) измерительных устройств. В эти понятия в основном вкладывается тот же смысл, что и в понятия систематической и случайной погрешностей измерений (см. § 1.4). Особенность здесь состоит в том, что всякое измерительное устройство предназначается для внесения определенности в исследуемый процесс, а наличие случайной составляющей погрешности приводит к неоднозначности. В связи с этим первая задача, которая обычно решается при создании измерительных устройств, состоит в том, чтобы случайную погрешность сделать незначительной. Если это условие выполняется, а элементы, входящие в состав измерительного устройства, стабильны, можно путем градуировки (см. гл. 15) обеспечить достаточно малые систематические погрешности измерительного устройства. Рассмотренная концепция используется как основная при создании рабочих средств измерений и, в частности, измерительных устройств для технологических измерений.

В зависимости от условий применения измерительных устройств различают основную и дополнительную погрешности (см. рис. 2.6).

Основной погрешностью средства измерений называют погрешность при использовании его в нормальных условиях. Нормальными

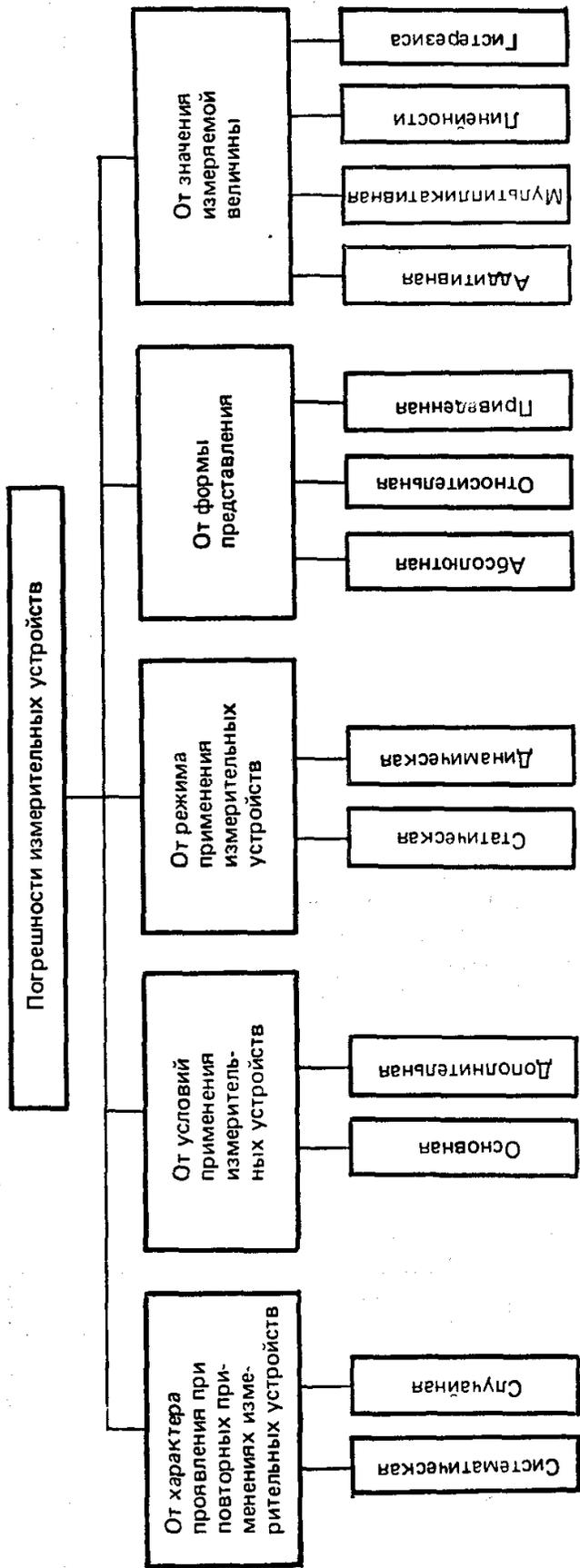


Рис. 2.6. Классификация погрешностей измерительных устройств

условиями применения средств измерений называют условия, при которых влияющие величины имеют номинальные значения или находятся в пределах нормальной области значений. Нормальные условия применения указываются в стандартах или технических условиях на средства измерений. При использовании средств измерений в нормальных условиях считают, что влияющие на них величины практически никак не изменяют их характеристики.

Дополнительной погрешностью измерительного преобразователя (или изменением показаний измерительного прибора) называют изменение его погрешности, вызванной отклонением одной из влияющих величин от ее нормативного значения или выходом ее за пределы нормальной области значений. Дополнительная погрешность может быть вызвана изменением сразу нескольких влияющих величин.

Изменение погрешности, как и других характеристик и параметров измерительных устройств под действием влияющих величин, описывается функциями влияния (см. приложение 1).

Иными словами, дополнительная погрешность — это часть погрешности, которая добавляется (имеется в виду алгебраическое сложение) к основной в случаях, когда измерительное устройство применяется в рабочих условиях. *Рабочие условия* обычно таковы, что изменения значений влияющих величин для них существенно больше, чем для нормальных условий, т. е. область рабочих (часть этой области называют расширенной областью) условий включает в себя область нормальных условий.

В некоторых случаях основная погрешность измерительных устройств определяется для рабочей области изменения значений влияющих величин. В этих случаях понятие дополнительной погрешности теряет смысл.

В зависимости от режима применения различают *статическую* и *динамическую погрешности* измерительных устройств (см. приложение 1).

По форме представления принято различать абсолютную, относительную и приведенную погрешности измерительных устройств (рис. 2.6). Для измерительных приборов и преобразователей определение этих погрешностей специфично. У измерительных приборов имеется шкала, отградуированная в единицах входной величины, либо шкала, отградуированная в условных единицах с известным множителем шкалы, поэтому результат измерения представляется в единицах входной величины. Это обуславливает простоту определения погрешности измерительных приборов.

Абсолютной погрешностью измерительного прибора Δ называют разность показаний прибора $X_{п}$ и истинного (действительного) $X_{д}$ значения измеряемой величины:

$$\Delta = X_{п} - X_{д} \quad (2.11)$$

Действительное значение определяется с помощью образцового прибора или воспроизводится мерой.

Относительной погрешностью измерительного прибора называют отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к действительному значению измеряемой величины. Относительную погрешность в процентах:

$$d = \frac{\Delta 100}{X_d} \quad (2.12)$$

Так как $\Delta \gg X_d$ или X_{II} , то в выражении (2.12) вместо значения X_d может быть использовано значение X_{II} .

Приведенной погрешностью измерительного прибора называют отношение абсолютной погрешности измерительного прибора к нормирующему значению X_N . Приведенную погрешность также выражают в процентах:

$$g = \frac{\Delta 100}{X_N} \quad (2.13)$$

В качестве нормирующего значения используется верхний предел измерений, диапазон измерений и др., т. е.

$$g = \frac{\Delta 100}{X_B - X_H} \quad (2.14)$$

У измерительных преобразователей результаты измерений представляются в единицах выходной величины. В связи с этим для измерительных преобразователей принято различать погрешности по входу и выходу. При определении этих погрешностей необходимо знать приписанную данному измерительному преобразователю функцию преобразования (градуировочную характеристику) $Y=f(X)$.

Абсолютной погрешностью измерительного преобразователя по выходу Δ_y , называют разность между действительным значением величины Y_{II} на выходе преобразователя, отображающей измеряемую величину, и значением Y_d величины на выходе, определяемым по действительному значению величины на входе с помощью градуировочной характеристики, приписанной преобразователю:

$$p(y) = \frac{1}{2s_M \cdot \sqrt{2p}} \cdot \left[e^{-\frac{(y-c)^2}{2s_M^2}} + e^{-\frac{(y+c)^2}{2s_M^2}} \right] \quad (2.15)$$

где Y_{II} — значение выходного сигнала преобразователя при определенном значении входного сигнала; Y_d — значение выходного сигнала, который должен вырабатываться преобразователем, лишенным погрешности, при том же значении входного сигнала. Значение Y_{II} определяют с помощью образцового

средства измерений, а значение Y_d рассчитывают с помощью функции преобразования по действительному значению входной величины X_d , которое воспроизводится мерой или определяется с помощью соответствующего образцового средства измерений:

$$Y_d = f(X_d) \quad (2.16)$$

Из (2.15) и (2.16) находим)

$$\Delta_y = Y_{\Pi} - f(X_d) \quad (2.17)$$

Абсолютной погрешностью измерительного преобразователя по входу Δ_x называют разность между значением X_{Π} величины на входе преобразователя, определяемым по действительному значению Y_d величины на его выходе с помощью градуировочной характеристики, приписанной преобразователю, и действительным значением X_d величины на входе преобразователя:

$$\Delta_x = X_{\Pi} - X_d \quad (2.18)$$

Значение X_{Π} определяется с помощью соответствующего образцового средства измерений или воспроизводится мерой, а значение X_d определяется по значению Y_{Π} выходного сигнала с помощью функции преобразования, решенной относительно X , т. е. $X_{\Pi} = \varphi(Y_{\Pi})$ (φ — символ обратный функции преобразования). Таким образом,

$$\Delta_x = j(Y_{\Pi}) - X_d \quad (2.19)$$

Относительной погрешностью измерительного преобразователя по входу (выходу) называют отношение абсолютной погрешности измерительного преобразователя по входу (выходу) к действительному значению величины на входе (к значению величины на выходе, определяемому по действительному значению величины на входе по градуировочной характеристике, приписанной преобразователю) :

$$d_x = \frac{\Delta_x}{X_d} 100 = \frac{j(Y_{\Pi}) - X_d}{X_d} 100 \quad (2.20)$$

$$d_x = \frac{\Delta_y}{Y_d} 100 = \frac{Y_{\Pi} - f(X_d)}{f(X_d)} 100 \quad (2.21)$$

где δ_x и δ_y — относительная погрешность по входу и выходу соответственно.

Приведенной погрешностью измерительного преобразователя по входу (выходу) называют отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению входного X_H (выходного Y_H) сигнала:

$$g_x = \frac{\Delta_x}{X_N} 100 = \frac{j(Y_{II}) - X_D}{X_N} 100 \quad (2.22)$$

$$g_y = \frac{\Delta_y}{Y_N} 100 = \frac{Y_{II} - f(X_D)}{Y_N} 100 \quad (2.23)$$

где γ_x и γ_y — приведенная погрешность измерительного преобразователя по входу и выходу соответственно.

Обычно в качестве нормирующего значения используется диапазон измерений преобразователя $X_B—X_H$ или соответствующий ему диапазон измерений выходного сигнала $Y_B—Y_H$. Тогда

$$g_x = \frac{j(Y_{II}) - X_D}{X_B - X_H} 100 \quad (2.24)$$

$$g_y = \frac{Y_{II} - f(X_D)}{Y_B - Y_H} 100 \quad (2.25)$$

Для измерительных преобразователей с линейной функцией преобразования вида $Y—Y_H = K(X—X_H)$ приведенные погрешности по входу и выходу в соответствии с (2.24) и (2.25) определяются выражениями:

$$g_x = \frac{(Y_{II} - Y_H) / K + X_H - X_D}{X_B - X_H} \quad (2.26)$$

$$g_y = \frac{Y_{II} - K(X_D - X_H) + Y_H}{Y_B - Y_H} \quad (2.27)$$

где K — коэффициент преобразования измерительного преобразователя, определяемый отношением $(Y_B—Y_H)/(X_B—X_H)$.

Чрезвычайно важным для применения измерительных устройств и правильной оценки погрешности измерений, получаемой при их использовании, являются сведения о зависимости погрешности от значения измеряемой величины в пределах диапазона измерений, а также сведения о изменениях этой погрешности под действием влияющих величин.

Зависимость погрешности от значения измеряемой величины определяется принятой конструкцией (схемой) и технологией изготовления измерительного устройства. Влияние названных факторов на эту зависимость различно. Зависимость погрешности от значения измеряемой величины свойственна всем измерительным устройствам данного типоразмера, построенным по принятой конструкции. Влияние технологии изготовления на рассматриваемую зависимость индивидуально для каждого экземпляра, т. е. значения погрешностей при одних и тех же значениях измеряемого параметра различны для различных экземпляров измерительного устройства данного типоразмера.

Для рассмотрения зависимости погрешности измерительных устройств от значения измеряемой величины удобно использовать понятие номинальной и реальной функций преобразования измерительного устройства.

Номинальной (или идеальной) функцией преобразования называют функцию преобразования, которая приписана измерительному устройству данного типа, указана в его паспорте и используется при выполнении с его помощью измерений.

Реальной функцией преобразования называют ту функцию преобразования, которой обладает конкретный экземпляр измерительного устройства данного типа.

Из-за несовершенства конструкции и технологии изготовления реальная функция преобразования измерительного устройства отличается от номинальной. Это отличие и определяет погрешность данного измерительного устройства. Отклонения реальной характеристики от номинальной различны и зависят от значения измеряемой величины. По этому признаку погрешности принято разделять (рис. 2.6) на аддитивную, мультипликативную, линейности и гистерезиса.

Графически образование перечисленных погрешностей показано на рис. 2.7.

Аддитивной (получаемой путем сложения), или *погрешностью нуля* измерительных устройств, называют погрешность, которая остается постоянной при всех значениях измеряемой величины.

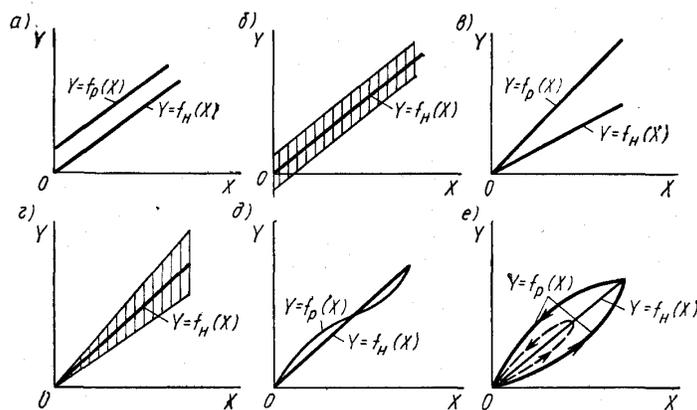


Рис. 2.7. Реальные функции преобразования измерительных устройств

На рис. 2.7, а показано, что реальная функция преобразования $Y=f_p(X)$ несколько смещена относительно номинальной $H=f_H(X)$, т. е. выходной сигнал измерительного устройства при всех значениях измеряемой величины X будет больше (или меньше) на одну и ту же величину, чем он должен быть, в соответствии с номинальной функцией преобразования.

Если аддитивная погрешность является систематической, то она может быть устранена. Для этого в измерительных устройствах обычно имеется специальный настроечный узел (корректор) нулевого значения выходного сигнала.

Если аддитивная погрешность является случайной, то ее нельзя исключить, а реальная функция преобразования смещается по отношению к номинальной во времени произвольным образом. При этом для реальной функции преобразования можно определить некоторую полосу (рис. 2.7, б), ширина которой остается постоянной при всех значениях измеряемой величины.

Возникновение случайной аддитивной погрешности обычно вызвано трением в опорах, контактными сопротивлениями, дрейфом нуля, шумом и фоном измерительного устройства (см. приложение 1).

Мультипликативной (получаемой путем умножения), или *погрешностью чувствительности* измерительных устройств, называют

погрешность, которая линейно возрастает (или убывает) с увеличением измеряемой величины.

Графически появление мультипликативной погрешности интерпретируется поворотом реальной функции преобразования относительно номинальной (рис. 2.7, в). Если мультипликативная погрешность является случайной, то реальная функция преобразования представляется полосой, показанной на рис. 2.7, г. Причиной возникновения мультипликативной погрешности обычно является изменение коэффициентов преобразования отдельных элементов и узлов измерительных устройств.

На рис. 2.7, д показано взаимное расположение номинальной и реальной функций преобразования измерительного устройства в случае, когда отличие этих функций вызвано нелинейными эффектами. Если номинальная функция преобразования линейная, то вызванную таким расположением реальной функции преобразования систематическую погрешность называют *погрешностью линейности*. Причинами данной погрешности могут быть конструкция (схема) измерительного устройства и нелинейные искажения функции преобразования, связанные с несовершенством технологии производства.

Наиболее существенной и трудноустранимой систематической погрешностью измерительных устройств является *погрешность гистерезиса* (от греч. *hysteresis* — запаздывание), или *погрешность обратного хода*, выражающаяся в несовпадении реальной функции преобразования измерительного устройства при увеличении (*прямой ход*) и уменьшении (*обратный ход*) измеряемой величины (рис. 2.7, е). Причинами гистерезиса являются: люфт и сухое трение в механических передающих элементах, гистерезисный эффект в ферромагнитных материалах, внутреннее трение в материалах пружин, явление упругого последействия в упругих чувствительных элементах, явление поляризации в электрических, пьезоэлектрических и электрохимических элементах и др. Существенным при этом является тот факт, что форма получаемой петли реальной функции преобразования зависит от предыстории, а именно от значения измеряемой величины, при котором после постепенного увеличения последней начинается ее уменьшение (на рис. 2.7, е это показано пунктирными линиями).

Для количественной оценки погрешности гистерезиса обратимся к рис. 2.8. Здесь показан фрагмент взаимного расположения реальной и номинальной функций преобразования измерительного устройства, обладающего погрешностью гистерезиса. Под действием влияющих величин реальная функция преобразования изменяет свое расположение и форму. На рис. 2.8, а для примера показаны два ее расположения, нанесенные сплошной и пунктирной линиями. При нормальных условиях эксплуатации измерительного устройства все изменения формы реальной функции преобразования не выходят за пределы заштрихованных на рис. 2.8, а полос как для верхней, так и для нижней ее ветвей. Если влияющие величины,

вызывающие изменения положения и формы функции преобразования, при измерении не выявляются, то рассматриваемое явление определяется как невоспроизводимость и характеризует случайную погрешность измерительного устройства. При этом используют понятие «размах» и «вариация».

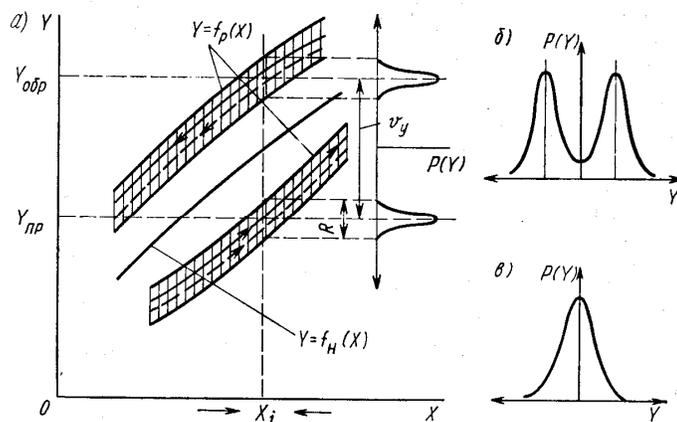


Рис. 2.8. Взаимное расположение реальной и номинальной функций преобразования измерительного устройства, обладающего погрешностью гистерезиса

Размахом (непостоянством) γ выходного сигнала измерительного преобразователя (показаний измерительного прибора) называют разность между наибольшим и наименьшим значениями выходного сигнала, соответствующими одному и тому же значению измеряемой величины и полученными при многократном и одностороннем подходе к этому значению, т. е. при постепенном увеличении или уменьшении измеряемой величины (только при прямом или только при обратном ходе).

Размах характеризует ширину заштрихованных на рис. 2.8, *a* полос, определяющих случайную погрешность при значении измеряемого параметра, равном X_L

Вариацией v_y выходного сигнала измерительного преобразователя (показаний измерительного прибора) называют среднюю разность между значениями выходного сигнала, соответствующими одному и тому же значению измеряемой величины, полученными при многократном и двустороннем подходе к этому значению, т. е. при постепенном увеличении и последующем уменьшении измеряемой величины (иначе говоря, при прямом и обратном ходе).

Как видно из рис. 2.8, *a*, при одном и том же значении измеряемой величины X_i закон распределения выходного сигнала измерительного

устройства при наличии вариации является двухмодальным. Если размахи для нижней и верхней ветвей функции преобразования перекрываются, то закон распределения выходного сигнала имеет вид, показанный на рис. 2.8, б. Формы функций преобразования с законами распределения (рис. 2.8, а, б) являются наиболее типичными для рабочих измерительных устройств, в том числе для устройств, используемых при технологических измерениях. В частном случае при отсутствии вариации закон распределения выходного сигнала является одномодальным или нормальным (рис. 2.8, в).

Абсолютное значение вариации определяется для измерительных приборов v_x и преобразователей v_y соответственно из выражений:

$$n_x = X_{np} - X_{обр} \quad (2.28)$$

$$n_y = Y_{np} - Y_{обр} \quad (2.29)$$

где X_{np} и $X_{обр}$ — показания измерительного прибора при прямом и обратном ходах;

Y_{np} и $Y_{обр}$ — выходной сигнал измерительного преобразователя при прямом и обратном ходах.

Приведенное значение вариации обычно определяется для измерительных приборов W_x и преобразователей W_y соответственно из выражений:

$$W_x = \frac{n_x}{X_B - X_H} 100 = \frac{X_{np} - X_{обр}}{X_B - X_H} 100 \quad (2.30)$$

$$W_y = \frac{n_y}{Y_B - Y_H} 100 = \frac{Y_{np} - Y_{обр}}{Y_B - Y_H} 100 \quad (2.31)$$

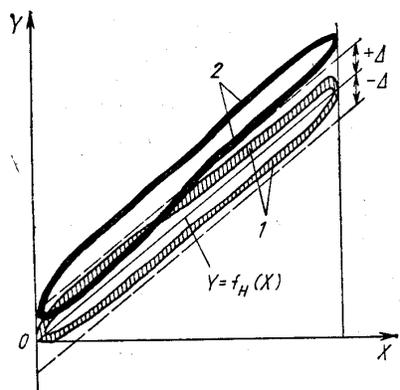


Рис. 2.9. Смещение реальной функции преобразования при эксплуатации измерительного устройства в рабочих условиях

т. е. определяется как отношение абсолютного значения вариации к диапазону измерения по входу или по выходу измерительного устройства.

Использование приведенных представлений о номинальной и реальной функциях преобразования позволяет наглядно отразить изменения погрешностей измерительных устройств под действием влияющих величин (рис. 2.9). Предположим, что при эксплуатации некоторого измерительного устройства в нормальных условиях его реальная функция преобразования имеет вид петлеобразной кривой 1, где заштрихованная

полоса определяет случайную погрешность, вызванную изменением влияющих величин в допустимых нормальными условиями пределах. При этом обычно для измерительного устройства устанавливается значение основной погрешности. На рис. 2.9 это показано графически в виде полосы шириной $\pm\Delta$. Если измерительное устройство эксплуатируется в рабочих условиях, когда значение одной или нескольких влияющих величин выходит за пределы, соответствующие значениям при нормальных условиях, функция преобразования выходит за установленное для данного измерительного устройства значение полосы основной погрешности (петлеобразная кривая 2 на рис. 2.9), т. е. появляется дополнительная погрешность.

§ 2.6. Нормирование метрологических характеристик измерительных устройств

Все рассмотренные в § 2.3 — 2.5 характеристики измерительных устройств принято называть метрологическими, так как они влияют на точность осуществляемых с помощью этих устройств измерений.

Средства измерений, в том числе и измерительные устройства, допускаются к применению только в том случае, если установлены нормы — нормированы их метрологические характеристики. Сведения о последних приводятся в технической документации на средства измерений.

Для удобства использования, анализа и нормирования метрологических характеристик средств измерений их удобно классифицировать на группы, приведенные в табл. 2.2.

Посредством нормирования метрологических характеристик обеспечивается взаимозаменяемость средств измерений и единство измерений в государственном масштабе. Реальные значения метрологических характеристик средств измерений определяются при их изготовлении, а затем периодически проверяются в процессе эксплуатации. При наличии отклонений хотя бы одной нормированной метрологической характеристики от нормы средство измерений регулируется, подвергается ремонту или бракуется и изымается из обращения.

Выбор нормируемых метрологических характеристик из числа приведенных в табл. 2.2 зависит от вида средства измерений и осуществляется в процессе разработки, освоения производства и аттестации средства измерений данного типоразмера (см. § 2.9).

Общий подход при нормировании метрологических характеристик состоит в том, что для всех нормируемых функций и значений устанавливаются номинальные функции и номинальные значения и пределы допустимых отклонений (например, номинальная функция преобразования, номинальная функция влияния, номинальное значение информативного параметра на выходе, номинальное значение постоянной времени и т. п.). Для остальных характеристик

Таблица 2.2

Метрологические характеристики измерительных устройств

Группа метрологических характеристик	Метрологические характеристики
Характеристики, предназначенные для определения результата измерений	Функция преобразования, коэффициент преобразования цена деления, чувствительность, диапазон измерений, верхний и нижний пределы измерений, диапазон показаний, конечное и начальное значения шкалы
Характеристики погрешности	Систематическая погрешность, случайная погрешность, основная погрешность, динамическая погрешность, порог чувствительности, мультипликативная погрешность, аддитивная погрешность, погрешности линейности, вариация, абсолютная, относительная и приведенная погрешности
Характеристики чувствительности к влияющим величинам	Функции влияния, дополнительная погрешность, изменение показаний, изменение коэффициента изменение коэффициента преобразований, значения неинформативного параметра выходного сигнала
Динамические характеристики	Дифференциальное уравнение, передаточная функция, комплексная частотная функция, переходная характеристика, импульсная переходная характеристика, амплитудно-фазовая характеристика, постоянная времени, время реакции, амплитудно-частотная характеристика, фазочастотная характеристика, полоса пропускания и др.
Характеристики взаимодействия с подключаемыми средствами измерения	Входной импеданс, выходной импеданс

устанавливаются пределы допустимых значений (например, пределы допускаемой основной погрешности, пределы допускаемой вариации и т. п.).

Определенную специфику имеет нормирование характеристик, определяющих точность измерений, выполняемых с помощью данного средства измерений (основная и дополнительная погрешности, размах, вариация).

Основная погрешность устройства для технологических измерений нормируется путем установления предела допускаемой абсолютной, относительной или приведенной погрешности:

$$\Delta = \pm a \quad (2.32)$$

$$d = \frac{\pm 1000\Delta}{X} = \pm c \quad (2.33)$$

$$g = \frac{\pm 1000\Delta}{X_N} = \pm b \quad (2.34)$$

где X — входной сигнал измерительного устройства.

Нормирующее значение X_N в выражении (2.34) принимают равным диапазону измерений (для многих измерительных устройств, в том числе для большинства устройств, используемых для технологических измерений), конечному значению шкалы, длине шкалы, если последняя имеет резко изменяющееся деление.

Способ задания пределов допускаемой основной погрешности для измерительных приборов и преобразователей определяется зависимостью их погрешности от значения измеряемой величины и требованиями простоты. Если у измерительных устройств данного типоразмера после соответствующей их регулировки погрешность практически не зависит от значения измеряемой величины, т. е. является аддитивной, то предел допускаемой основной погрешности нормируется абсолютной погрешностью, определяемой по формуле (2.32), либо приведенной погрешностью, определяемой по формуле (2.34).

Если погрешность измерительных устройств данного типоразмера является мультипликативной и пропорциональна значению измеряемой величины ($d = \pm \frac{c}{100} X$) то предел допускаемой основной погрешности удобно нормировать через относительную погрешность, определяемую по формуле (2.33), так как норма определяется одним числом:

$$d = \pm \frac{100c}{100X} X = \pm c \quad (2.35)$$

Значение предела относительной или приведенной погрешности определяется из ряда предпочтительных чисел:

$$[1; 1,5 (1,6); 2; 2,5 (3); 4; 5; 6] 10^n \quad (2.36)$$

Числа 1,6 и 3 допускаются к применению, но не рекомендуются. Значение n принимается равным: +1, 0, -1, -2 и т. д. Причем при одном значении n допускается устанавливать не более пяти различных пределов допускаемой погрешности для измерительных устройств конкретного вида.

При нормировании основной погрешности учитывается тот факт, что положение реальной функции преобразования в пределах полосы, определяемой пределом допускаемой основной погрешности, изменяется (см. рис. 2.8, а) за счет действия влияющих величин, что вызывает случайную погрешность, определяемую размахом R . Обычно допускаемое значение размаха принимается меньшим половины предела допускаемой погрешности:

$$R \leq 0.5\Delta \quad (2.37)$$

Для нормирования вариации измерительных устройств испол-1 зуют формулы (2.28), (2.29), (2.30) или (2.31), т. е. выражают ее абсолютным или приведенным значением. Значение же предела допускаемой вариации принимается в виде дольного (кратного) значения предела допускаемой основной погрешности обычно из следующих соотношений:

$$n_y = (1,0 \div 1,5)\Delta \quad (2.38)$$

$$W_y = (1,0 \div 1,5)g \quad (2.39)$$

Так как значение вариации всегда меньше удвоенного значения основной погрешности, то для некоторых измерительных устройств вариация не нормируется.

Дополнительная погрешность нормируется в тех случаях, когда при измерении влияющих величин в рабочей области основная погрешность превышает установленный для нее предел. Дополнительная погрешность нормируется: в виде постоянного значения $\Delta_{\text{доп}}$ для всей рабочей области влияющей величины или по отдельным интервалам этой области; путем указания отношения предела допускаемой дополнительной погрешности, принятой для регламентируемого интервала влияющей величины, к значению этого интервала, т. е. $\Delta_{\text{доп}} / \Delta\xi$ ($\Delta\xi$ — регламентируемый интервал влияющей величины); путем указания зависимости предела допускаемой дополнительной погрешности от влияющей величины, т. е.

$$\Delta_{\text{доп}} = E(x)$$

Пределы допускаемой дополнительной погрешности, как правило, устанавливаются в виде дольного (кратного) значения предела допускаемой основной погрешности.

Измерительные устройства принято разделять на классы точности.

В настоящее время *класс точности* Λ трактуется как обобщенная характеристика средств измерений, определяемая пределами допускаемых основной и дополнительной погрешностей, а также рядом других свойств, влияющих на точность осуществляемых с их помощью измерений.

Связь между пределами основной и дополнительной погрешностей, а также с другими свойствами средств измерений обычно регламентируется соответствующими стандартами на отдельные виды средств измерений.

Классы точности не устанавливаются только для тех средств измерений, для которых отдельно нормируется систематическая и случайная составляющие погрешности, а также для средств измерений, для которых нормируется и имеет существенное значение динамическая погрешность.

Обозначение классов точности Λ производится в зависимости от способов задания пределов допускаемой основной погрешности. Если последняя выражается приведенной (2.34) или относительной (2.33) погрешностью, применяются соответственно следующие

обозначения: 1,5 и $\textcircled{1.5}$ (обозначения приведены для класса точности 1,5). В рассмотренных (наиболее распространенных) случаях обозначение класса точности дает информацию о пределе допускаемой основной погрешности. Числовые значения для классов точности выбирают из приведенного ряда (2.36).

Для измерительных приборов и преобразователей, применяемых для технологических измерений, как правило, нормальные условия эксплуатации выбирают такими, что в большинстве случаев исключается необходимость нормирования дополнительной погрешности. Поэтому класс точности однозначно определяет точность этих средств измерений.

§ 2.7. Структурные схемы и метрологические характеристики измерительных систем

Для измерительных систем можно выделять некоторые общие структурные схемы.

На рис. 2.10 показаны структурные схемы измерительных систем, используемых для автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами. Измерительная система, построенная по схеме 2.10, а, обеспечивает одновременное измерение и регистрацию всех величин объекта измерения, а измерительная система, построенная по схеме 2.10, б,— поочередно измерение и регистрацию.

Измерительная информация в приведенных измерительных системах формируется с помощью первичных измерительных преобразователей / и посылается в виде сигналов в канал связи 4.

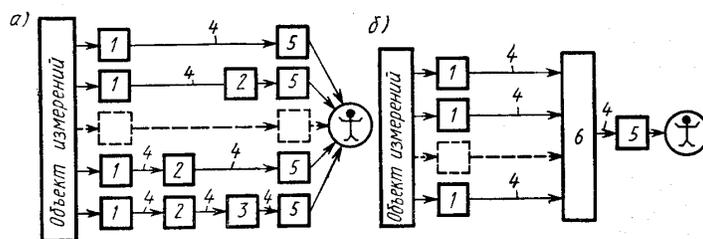


Рис. 2.10. Структурные схемы измерительных систем

В зависимости от типа измеряемой физической величины, принципа действия первичного измерительного преобразователя и расстояния, на которое необходимо передать информацию, в состав измерительной системы могут быть включены помимо первичных измерительных преобразователей промежуточный 2 (рис. 2.10, а) и передающий 3 измерительные преобразователи. При этом измерительный преобразователь может располагаться территориально около первичного или около прибора 5, измеряющего сигнал, поступающий

из канала связи, представляющего последний в форме, удобной для восприятия человеком, и осуществляющего регистрацию. Измерительный прибор 5 называют *вторичным прибором*, считая при этом, что все измерительные преобразователи, работающие с ним в комплекте, являются первичными приборами.

В измерительной системе (рис. 2.10, б) с поочередным подключением первичных измерительных преобразователей к прибору 5 применяется коммутатор б, который следует рассматривать как вспомогательное устройство. Для простоты на рис. 2.10, б показана измерительная система, в составе которой имеются только первичные измерительные преобразователи 1. В общем случае в нее могут быть включены промежуточные и передающие измерительные преобразователи. При этом выходные сигналы преобразователей всех измеряемых величин в отличие от системы, построенной по схеме рис. 2.10, а, должны быть одинаковыми по природе и диапазону измерений. Последнее необходимо для обеспечения возможности их измерения и регистрации одним и тем же прибором 5.

В структурных схемах рассмотренных измерительных систем можно выделить цепочки, состоящие из измерительных преобразователей, каналов связи и вторичных приборов. Если для каналов связи нормированы те же характеристики, что и для измерительных преобразователей и приборов измерительной системы, то можно рассматривать последнюю как последовательное соединение нескольких преобразователей.

Функция преобразования измерительной системы через известные функции преобразования отдельных преобразователей может быть в общем случае записана в виде

$$Y = f_n \{ \dots f_3 \{ f_2 \{ f_1 (X) \} \} \} \} \quad (2.40)$$

Если функции преобразования указанных преобразователей линейны, функция преобразования измерительной системы имеет вид

$$Y = \left(\prod_{i=1}^n K_i \right) X \quad (2.41)$$

где K_i — коэффициент преобразования i -го преобразователя.

Динамические свойства измерительной системы определяются динамическими свойствами входящих в ее состав преобразователей. С позиций теории автоматического регулирования измерительную систему можно рассматривать как последовательное соединение ряда динамических звеньев. Поэтому ее передаточную функцию можно представить произведением передаточных функций преобразователей:

$$W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p) \quad (2.41)$$

Для измерительных систем обычно нормируются те же метрологические характеристики, что и для измерительных устройств. В то же время следует подчеркнуть, что до сих пор не найдено теоретически обоснованное и практически целесообразное решение задачи нормирования метрологических характеристик измерительных систем.

При выполнении технологических измерений имеется лишь информация о метрологических характеристиках измерительных устройств, входящих в измерительную систему. Обычно эта информация представляется в виде класса точности, что для измерительных устройств, используемых для технологических измерений, соответствует пределу допускаемой приведенной погрешности. Поэтому для приближенной оценки приведенной погрешности измерительной системы из n включенных последовательно преобразователей с линейными функциями преобразования используют выражение:

$$g = \sum_{i=1}^n g_i \quad (2.43)$$

где g_i — приведенная погрешность i -го преобразователя.

Оценка погрешности измерительных систем, полученная с помощью выражения (2.43), является максимальной, так как предполагает одновременное появление максимальных погрешностей одного знака при любых значениях измеряемой физической величины у всех измерительных преобразователей, составляющих конкретную измерительную систему. Для получения более реальной погрешности измерительных систем суммирование приведенных погрешностей преобразователей осуществляется вероятностным методом, т. е. используют выражение [6, 10]:

$$g = \sqrt{\sum_{i=1}^n g_i^2} \quad (2.44)$$

При этом предполагается, что погрешности всех преобразователей независимы, закон распределения погрешностей для каждого из преобразователей является равномерным (см. рис. 1.9, а), а значение предела допускаемой приведенной погрешности определяет границы этого распределения. Если функции преобразования измерительных устройств, входящих в измерительную систему, нелинейны, то для оценки ее приведенной погрешности используют выражение

$$g = \sqrt{\sum_{i=1}^n W_i g_i^2} \quad (2.45)$$

где W_i — коэффициент влияния для i -го преобразователя.

Определение коэффициентов влияния W , осуществляется так же, как и при обработке результатов косвенных измерений (см. гл. 3).

§ 2.8. Надежность средств измерений

Использование для технологических измерений все более сложные измерительных приборов, преобразователей и систем определяет необходимость количественной оценки надежности их функционирования.

В общем случае *надежность* — свойство изделия (в том числе средства измерений) выполнять заданные функции, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени или требуемой наработки. Применительно к средствам измерения такими показателями являются нормируемые метрологические характеристики.

Под *наработкой (наработкой на отказ)* для средств измерений понимают продолжительность безотказной работы.

Количественными оценками надежности обычно служит вероятность безотказной работы средства измерений и интенсивность потока отказов для времени, в течение которого обеспечивается заданная вероятность безотказной работы.

Вероятностью безотказной работы называют вероятность того, что в определенных условиях в пределах заданной продолжительности работы отказов не возникает.

Вероятность безотказной работы $P(t)$ средств измерений является экспоненциальной функцией времени t работы:

$$P(t) = \exp\left[-\int I(t)dt\right] \quad (2.46)$$

Здесь $\lambda(t)$ — *интенсивность (параметр) потока отказов*, определяемая отношением частоты отказов к вероятности безотказной работы.

В начальный период работы обычно происходит приработка средств измерений, при этом выявляются скрытые дефекты, определяющие большую интенсивность отказов $\lambda(t)$. В интервале времени, определяющем период нормальной работы средства измерений, интенсивность отказов практически постоянна. Начиная с некоторого момента времени, интенсивность отказов постепенно возрастает, что определяется выработкой средством измерений установленного ресурса. Для периода нормальной работы средства измерений из (2.46) при постоянном значении $\lambda(t)$ для вероятности безотказной работы можно получить

$$P(t) = e^{-\lambda(t)t} \quad (2.47)$$

здесь $P(t)$, как и $K(t)$, — величина постоянная.

Учитывая, что период приработки мал, можно определить время безотказной работой T_p измерительного устройства:

$$P(t) = \frac{1}{I(t)} \quad (2.48)$$

Эту величину называют также *временем наработки на отказ*.

Приведенные сведения справедливы как для элементов, входящих в состав измерительных приборов или преобразователей, так и для измерительных систем, представляющих собой совокупность последних.

Если принять, что измерительная система содержит n измерительных устройств, вероятности отказов которых равны $P_2(\tau), \dots, P_i(\tau), \dots, P_n(\tau)$, и считать, что отказ любого из измерительных устройств приводит к отказу измерительной системы, то для вероятности отказа $P_c(\tau)$ этой системы запишем

$$P_c(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t) \quad (2.49)$$

$$P_c(t) = \exp\left[-t \sum_{i=1}^n I_i(t)\right] = \exp[-tI_c(t)] \quad (2.50)$$

где $P_i(\tau)$ —вероятность отказа i -го измерительного устройства; $\lambda_i(\tau)$, — интенсивность потока отказов i -го измерительного устройства; $I_c(t) = \sum_{i=1}^n I_i(t)$ — интенсивность потока отказов измерительной системы.

Среднее время безотказной работы измерительной системы будет

$$T_{pc} = \frac{1}{I_c(t)} \quad (2.51)$$

Для увеличения надежности средств измерений применяются блочно-модульный принцип построения, используют облегченный режим работы отдельных элементов и узлов, применяют резервирование элементов и целых измерительных устройств.

§ 2.9. Сведения о средствах измерений государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации

В конце 50-х годов в нашей стране с целью технически и экономически целесообразного решения проблемы обеспечения технологических процессов различных отраслей промышленности средствами контроля и автоматического регулирования были начаты разработки методов упорядочения и унификации средств автоматизации, которые положили начало созданию Государственной системы промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП).

В настоящее время ГСП достаточно полно разработана и продолжает развиваться и совершенствоваться [12]. Успехи в создании в масштабах целого государства системы промышленных средств

измерений определили тот факт, что сейчас ГСП ориентируется на обеспечение потребностей не только промышленности, но и науки, медицины, сельского хозяйства и др. По существу ГСП охватывает всю номенклатуру отечественного приборостроения. Создание ГСП явилось крупным событием в практике мирового приборостроения. В основу построения ГСП положены следующие принципы: выделение устройства по функциональным признакам, минимизация номенклатуры изделий, блочно-модульное построение технических средств, агрегатное построение систем управления, совместимость приборов и устройств.

По функциональному признаку все изделия ГСП делятся на четыре группы: устройства получения информации о состоянии процесса; устройства приема, преобразования и передачи информации по каналам связи; устройства преобразования, хранения, обработки информации и формирования команд управления; устройства использования командной информации для воздействия на объект управления.

Средства измерений входят в число устройств первой и второй из перечисленных групп и представляют собой первичные, промежуточные, масштабирующие (нормирующие) измерительные преобразователи, измерительные приборы и системы.

В зависимости от рода используемой энергии средства измерений и вспомогательные устройства ГСП подразделяют на четыре самостоятельные ветви: электрическую, пневматическую, гидравлическую

Таблица 2.3

Основные виды унифицированных аналоговых сигналов ГСП

Вид сигнала	Физическая величина	Параметры сигнала
Электрический	Постоянный ток	0÷5; 0÷20; -5÷0÷5; 4÷20 мА
	Постоянное напряжение	0÷10; 0÷20; -10÷0÷10 мВ 0÷10; 0÷1; -1÷0÷1 В
	Переменное напряжение	0÷2; -1÷0÷1 В
	Частота	2÷8; 2÷4 кГц
Пневматический	Давление	0.2÷1 кгс/см ² ; (0.02÷0.1 МПа)
Гидравлический	»	0.1÷6.4 МПа

и не использующую вспомогательной энергии. Все средства измерений и устройства электрической, пневматической и гидравлической ветвей имеют унифицированные входные и выходные сигналы, перечень которых приведен в табл. 2.3. Связь электрических, пневматических и гидравлических устройств осуществляется с помощью соответствующих преобразователей сигналов. Этим обеспечивается создание комбинированных средств ГСП. Средства ГСП строятся из блоков и модулей (см. приложение 1).

Блочно-модульный принцип построения средств ГСП обеспечивает возможность создания различных функционально сложных устройств из ограниченного числа более простых унифицированных блоков и модулей путем их наращивания и стыковки. Это позволяет создавать новые средства измерений и автоматизации из уже существующего набора узлов и блоков, что дает существенный экономический эффект.

Измерительные устройства и системы составляют самую многочисленную группу изделий ГСП, составляющую более половины номенклатуры промышленных изделий ГСП. Они обеспечивают получение измерительной информации о физических величинах (параметрах), характеризующих технологические процессы, свойства и качество продукции.

Классификация измерительных устройств ГСП, учитывающая вид входных и выходных сигналов, приведена на рис. 2. 11. Под «естественным» выходным сигналом в приведенной классификации понимают выходную физическую величину первичного измерительного преобразователя, полученную однократным простым («естественным») преобразованием измеряемой физической величины и не соответствующую по параметрам унифицированным сигналам. При этом под простым преобразованием понимают только преобразование, обеспечиваемое используемым для измерения физическим явлением. Несмотря на большое разнообразие величин, виды естественных выходных сигналов ГСП удастся ограничить десятью, приведенными на рис. 2. 11.

Для преобразования естественного выходного сигнала в унифицированный в ГСП используются нормирующие преобразователи (см. рис. 2.11). В ГСП, несмотря на значительное разнообразие измеряемых величин и используемых для этого принципов измерений, применяются четыре структурные схемы измерительных устройств, а именно: схема однократного прямого преобразования, схема уравнивающего преобразования (часто называется компенсационной), схема последовательного прямого преобразования, схема дифференциального прямого преобразования.

Подробно применение упомянутых схем будет освещено далее при рассмотрении работы конкретных измерительных устройств

Нормирование метрологических характеристик средств измерений ГСП осуществляется по группам, выделенным в зависимости от Функционального назначения [12].

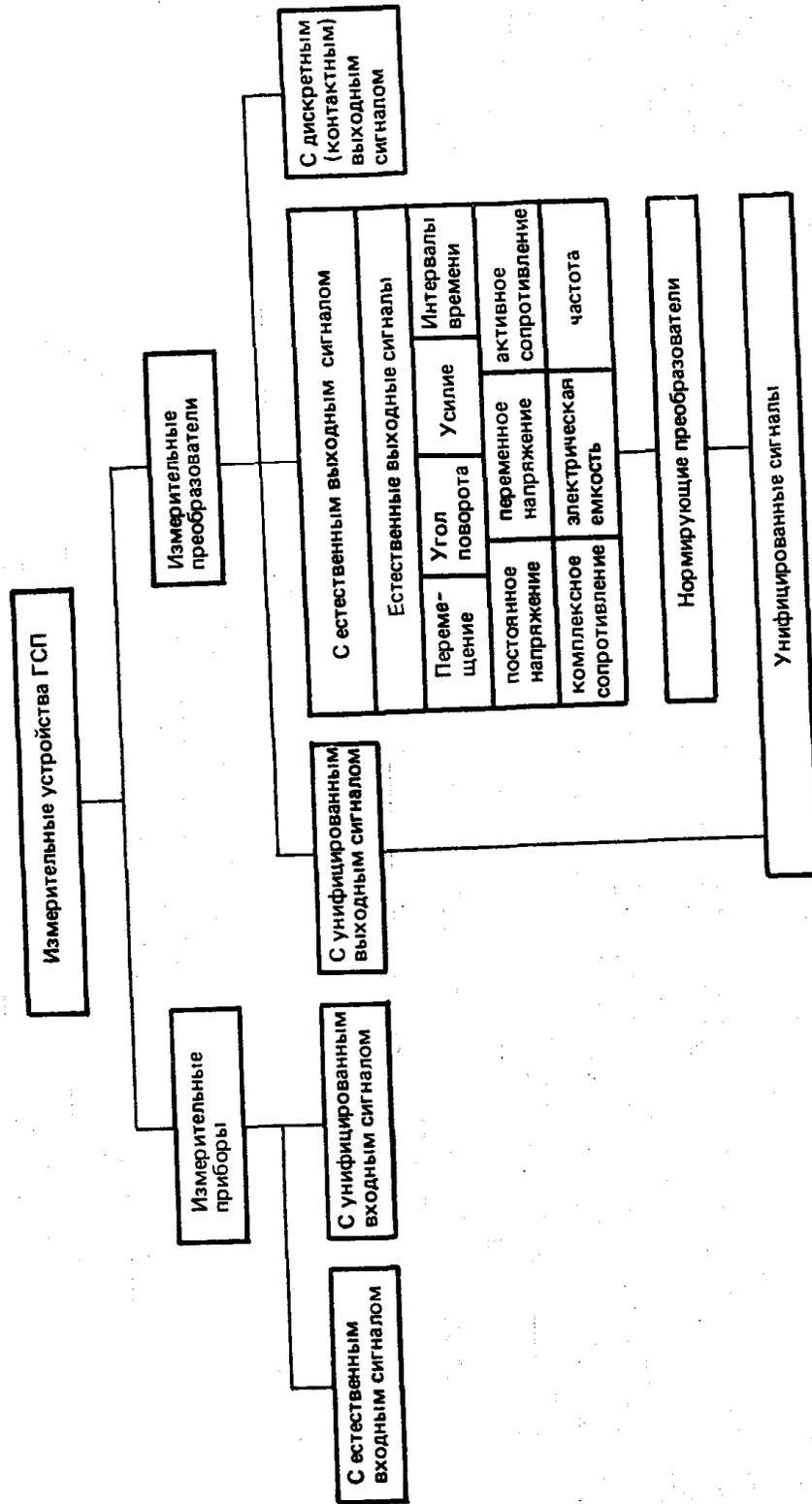


Рис. 2.11. Классификация средств измерений ГСП по входным и выходным сигналам

Средства измерений ГСП, служащие для технологических измерений, в основном являются аналоговыми и имеют малую случайную составляющую погрешности. Поэтому их метрологические характеристики нормируются комплексами [12], включающими обычно: номинальную функцию преобразования, предел допускаемой основной погрешности, предел допускаемой вариации, динамическую характеристику, номинальное значение входного импеданса, номинальное значение выходного импеданса (для измерительных преобразователей), предел допускаемой дополнительной погрешности (для некоторых измерительных приборов).

В ГСП предусмотрено несколько видов конструктивного исполнения [12] средств измерений: нормальное (обычное), пыле-, брызго- и взрывозащищенное.

ГЛАВА 3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ, ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ И ПОГРЕШНОСТИ

§ 3.1. Технологические измерения с однократными и многократными наблюдениями

Основной задачей технологических измерений является формирование потока измерительной информации, необходимой для непосредственного и непрерывного контроля и управления технологическими процессами. В то же время необходимо отметить, что круг применения технологических измерений существенно расширяется. Так, с внедрением в технологические процессы вычислительных машин и других средств вычислительной техники стало возможным с использованием средств технологических измерений выполнение косвенных и совокупных измерений, позволяющих получить измерительную информацию о комплексных показателях и составе потоков, определить технико-экономические показатели процессов и т. д.

Наиболее важным и нетрадиционным является применение технологических измерений для создания моделей технологических процессов, необходимых для их последующей оптимизации.

Невозможно успешное решение задач, связанных с перечисленными применениями технологических измерений, без предварительного изучения метрологических аспектов постановки, проведения и обработки результатов измерительного эксперимента (см. приложение 1).

Применительно к химико-технологическим процессам измерительный эксперимент выполняется с использованием всего арсенала средств измерений, рассмотренных в гл. 4—14, и достижений современной теории эксперимента. При этом используются измерения с однократными и многократными наблюдениями.

Общий подход к применению этих измерений состоит в следующем:

если систематические погрешности являются определяющими, т. е. их значения существенно больше значений случайных погрешностей, то целесообразно для определения значения измеряемой величины использовать измерение с однократным наблюдением;

если случайная погрешность является определяющей, то необходимо использовать измерение с многократными наблюдениями.

При этом для обоснованного применения измерений с однократным

наблюдением необходимо располагать дополнительной информацией о том, что значение случайной погрешности меньше, чем систематической (см. ниже), а для получения корректных результатов при использовании измерений с многократными наблюдениями необходимо иметь дополнительную информацию, обеспечивающую возможность исключения систематической погрешности.

Технологические измерения с однократными наблюдениями применяются для автоматического контроля всех важных параметров химико-технологических процессов, а именно: температуры, давления, уровня, расхода и качества. На основе измерений с однократными наблюдениями строятся автоматические системы регулирования названных технологических параметров и автоматизированные системы управления технологическими процессами. Необходимость применения измерений с однократными наблюдениями для решения указанных задач связана с тем, что современные технологические процессы характеризуются большими скоростями протекания, сложными взаимосвязями и многообразием возмущающих воздействий, поэтому технологические параметры этих процессов, как правило, без принятия соответствующих мер достаточно быстро изменяются. Это затрудняет и обычно делает невозможным применение измерений с многократными наблюдениями.

С использованием технологических измерений с однократными наблюдениями решаются в настоящее время задачи косвенных измерений, используемых для управления и учета комплексных показателей технологических процессов, таких, как коэффициенты полезного действия нагревательных аппаратов, насосов и компрессоров, кратность циркуляции потоков, степень конверсии, расход газовых потоков с изменяющимися параметрами (см. гл. 7, 14) и др. При этом осуществляются измерения с однократными наблюдениями ряда параметров (аргументов) и вычисления, выполняемые с помощью средств современной вычислительной техники.

Технологические измерения с однократными наблюдениями в сочетании со средствами вычислительной техники являются основой всех многопараметрических методов контроля состава вещества (см. гл. 12).

Область применения технологических измерений с многократными наблюдениями ограничена на технологических процессах контролем сырья, реагентов и готовой продукции, а также созданием математических моделей технологических процессов.

Возможность использования измерений с многократными наблюдениями для контроля сырья, реагентов и готовой продукции основывается на постоянстве измеряемых параметров этих сред на некотором отрезке времени, достаточном для выполнения нескольких наблюдений. Постоянство параметров указанных сред определяется тем, что они обычно хранятся в резервуарах или мерниках, что делает возможным проведение прямых, косвенных или совокупных (в зависимости от контролируемых параметров сред) измерений с многократными наблюдениями.

Создание математических моделей химико-технологических процессов является важнейшим этапом разработки автоматизированных систем управления последними. Для создания указанных моделей используются аналитические и экспериментальные методы. Последние применяются в подавляющем большинстве случаев.

Обычно математические модели экспериментальными методами определяются уравнением

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^{i=n} a_i X_i + \sum_{i=1}^{i=n-1} \sum_{k=i+1}^{k=n} a_{ik} X_i X_k + \sum_{i=1}^n a_{ii} X_i^2 \quad (3.1)$$

где Y — выходной параметр технологического процесса (функция); X_i, X_k — параметры, характеризующие технологический процесс, сырье и получаемые продукты (аргументы); a_0, a_i, a_{ik}, a_{ii} — постоянные коэффициенты, подлежащие определению.

Коэффициенты уравнения (3.1) определяются из решения системы уравнений, аналогичных по структуре уравнению (3.1) и составленных на основе прямых технологических измерений с многократными наблюдениями функции и аргументов.

Так как определяемые коэффициенты являются не одноименными величинами, а целью определения являются указанные функциональные зависимости, то создание экспериментальными методами математических моделей технологических процессов — типичный случай совместных измерений (см. § 1.2).

Проведение измерительного эксперимента должно быть основано на применении известной (типовой) или специально разработанной для него метрологами-профессионалами (частной) методики проведения измерений.

Методика выполнения измерений (методика измерений) — это совокупность метода, средств, процедур, и условий подготовки и проведения измерений (компоненты измерений), а также правил обработки результатов измерений. По существу методика выполнения измерений представляет собой технологию этого измерений

Методики выполнения измерений регламентируются: государственными, отраслевыми стандартами и стандартами предприятий; аттестатами методик выполнения измерений; соответствующими разделами стандартов технологических процессов, методов испытания и контроля продукции, методов и средств поверки средств измерений.

Аттестацию методик выполнения измерений осуществляют организации государственной и ведомственной метрологических служб.

Использование стандартизованных или аттестованных методик выполнения измерений позволяет официально признавать правильность полученных результатов измерений.

Применительно к технологическим измерениям, выполняемым на химико-технологических процессах, разработка и применение

методики выполнения измерений должны осуществляться во всех случаях, когда указанные измерения используются для контроля количества и качества выпускаемой продукции, а также при проведении исследований, направленных на создание математических моделей технологических процессов. При получении измерительной информации о технологических параметрах объектов с помощью систем автоматического контроля в разработке методики выполнения измерений нет необходимости, так как использование автоматического контроля параметров уже по существу предусматривает применение соответствующей методики выполнения измерения.

§ 3.2. Представление результатов измерений

Практикой обработки результатов измерительных экспериментов выработаны правила округления результатов, которые по соглашению признаются и применяются при выполнении любых измерений. Погрешность результата измерения физической величины должна давать представление о том, какие цифры в его числовом значении являются сомнительными. Поэтому числовое значение результата измерения должно быть представлено так, чтобы оно оканчивалось десятичным знаком того же разряда, что и значение его погрешности. Большее число разрядов не имеет смысла, так как не уменьшает неопределенность результата, а меньшее, которое может быть получено путем округления, увеличивает неопределенность. Поэтому погрешность результата измерения нецелесообразно выражать большим числом цифр. Достаточно ограничиться одной значащей цифрой или двумя, если вторая — цифра 5. Две значащие цифры используются только при определении погрешности ответственных точных измерений.

Для округления и записи результатов измерений используются следующие правила.

1. Результат измерения определяется так, чтобы он оканчивался цифрой того же разряда, что и значение его погрешности, при этом нули в десятичной дроби числового значения результата отбрасываются только до того разряда, который соответствует разряду числового значения погрешности.

2. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше 5, то остающиеся цифры числа не изменяются. При этом лишние цифры в целых числах заменяются нулями, а в десятичных дробях отбрасываются.

3. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов больше или равна 5, а за ней следуют отличные от нуля цифры, то последняя оставляемая цифра увеличивается на единицу.

4. Если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней цифры неизвестны или нули, то последнюю сохраняемую цифру числа не изменяют, если она четная, и увеличивают на единицу, если она нечетная.

Число значащих цифр в числовом значении результата измерения при использовании приведенных правил позволяет ориентировочно судить о точности измерения.

§ 3.3. Обнаружение и исключение систематических погрешностей

В гл. 1 было указано, что погрешность измерения содержит систематическую и случайную составляющие. Причем систематическая погрешность вызывает смещение результата измерений и является наиболее опасной, так как во многих случаях о ее существовании даже не подозревают. Систематические погрешности измерений на технологических процессах являются причиной неправильного управления объектами, неправильного учета и брака продукции.

Обнаружение систематических погрешностей измерений является одной из самых сложных задач метрологии. В том или ином виде ее приходится решать при подготовке и проведении технологических измерений.

Близость к нулю систематической погрешности определяется как *правильность измерений*. Исключение систематической погрешности из результатов измерений рассматривается как исправление этих результатов. Поэтому результаты наблюдений или измерений, содержащие неисключенную систематическую погрешность, называют *неисправленными*, а результаты, в которых систематическая погрешность исключена, — *исправленными*.

Общепринятыми методами обнаружения и исключения систематической погрешности являются следующие: устранение источников погрешности до начала измерений, использование дополнительных измерений, внесение поправок в результаты измерений, оценка границ систематических погрешностей в случае невозможности их исключения, использование специальных методов измерения.

Последние из перечисленных методов определяют одно из перспективных направлений измерительной техники (см. § 3.8).

Устранение источников систематических погрешностей до начала измерений является одним из наиболее радикальных путей, так как позволяет полностью или частично освободиться от необходимости применения других из названных выше способов, а также ускорить процесс измерения.

Под устранением источника погрешностей принимают удаление источников теплоты, вибрации, электромагнитных полей и других от средств измерений или защиту последних от указанных источников, если по условиям применения средств измерений они не могут быть удалены от источников погрешности.

Надежным средством обнаружения систематических погрешностей является использование дополнительных измерений, а именно: измерения, основанного на ином методе или принципе; измерения, выполняемого с помощью второго средства измерения, аналогичного

основному или иного по принципу действия; измерения, выполненного с помощью более точного средства измерений.

Исключение систематической погрешности из результата измерений осуществляется путем применения поправок или поправочных множителей.

В первом, наиболее распространенном случае осуществляется алгебраическое сложение результата измерения и поправки. Под поправкой при этом понимают систематическую погрешность, взятую с обратным знаком.

Во втором случае результат измерения умножают на поправочный множитель, который может быть больше или меньше единицы. Поправочный множитель обычно применяется тогда, когда систематическая погрешность является мультипликативной.

В обоих случаях высокая точность результата достигается при условиях, что поправка мала по сравнению с измеренным значением или поправочный множитель близок к единице. Само значение поправок и поправочных множителей находят указанными выше путями, а также путем поверки средств измерений. Поправки для учета влияния тех или иных влияющих величин, при известных функциях влияния, определяют на основе вспомогательных измерений этих величин.

В некоторых случаях исключить систематическую погрешность из результата измерения оказывается нецелесообразным из-за технической сложности. В этих случаях по известному значению систематической погрешности средства измерений оценивается погрешность выполненного измерения. Оценка границ систематической погрешности осуществляется обычно и при внесении поправок.

Систематическая погрешность, остающаяся после введения поправок, включает в себя ряд элементарных составляющих, называемых неисключенными остатками систематической погрешности. Они связаны в основном с погрешностью определения поправок и погрешностью, зависящей от точности измерения влияющих величин, входящих в функцию влияния.

Для определения границ неисключенной систематической погрешности результата измерения часто предполагается, что неисключенные остатки систематической погрешности являются случайными величинами, распределенными по равномерному закону (см. рис. 1.9, а). На этом основании границу θ неисключенной систематической погрешности определяют по формуле

$$q = r \sqrt{\sum_{k=1}^l q_k^2} \quad (3.2)$$

где θ_k — граница k -й неисключенной систематической погрешности; r — коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью, равный 1,1 при доверительной вероятности 0,95; l — общее число неисключенных остатков систематических погрешностей.

Все рассмотренные общие способы обнаружения и устранения систематических погрешностей в той или иной степени находят применение при проведении технологических измерений.

При получении измерительной информации о технологических параметрах с помощью систем автоматического контроля, как правило, заранее предусматриваются и осуществляются мероприятия по устранению источников систематических погрешностей или защите от них средств измерений. Если имеются сомнения в показаниях каких-либо средств измерений, то применяют дополнительные измерения, осуществляемые с использованием иных методов, принципов и средств измерений, чем основные, а также с целью контроля выполняются параллельные измерения с помощью более точных средств измерений.

Введение поправок, оценка границ неисключенной систематической погрешности и специальные высокоточные методы измерений применяются при контроле средствами технологических измерений качества, расхода и количества сырья, промежуточных и конечных продуктов, а также при создании математических моделей химико-технологических процессов.

§ 3.4. Оценивание результата и погрешности прямых измерений с многократными наблюдениями

Рассмотренные в § 1.4 характеристики случайной величины справедливы только при бесконечно большом числе наблюдений, т. е. они в сущности являются теоретическими. На практике число наблюдений, выполняемых при проведении измерительных экспериментов, ограничено и редко превосходит 20—30. Поэтому для обработки результатов измерительных экспериментов используют математическую статистику. В общем случае для выявления закономерностей, отражающих поведение случайной величины при ограниченном числе наблюдений, в математической статистике также решается задача определения закона распределения. Однако выявляемые при этом закономерности содержат элемент случайности. Статистический материал может только с большим или меньшим правдоподобием подтверждать или не подтверждать справедливость того или иного предположения (задача проверки правдоподобия гипотез). Чаще при обработке результатов наблюдений при измерении физических величин не возникает вопрос об определении закона распределения. Обычно это бывает связано с малым числом наблюдений (например, при 3—5 наблюдениях) или априорным утверждением о том, что закон распределения случайной величины является нормальным. Последнее утверждение, как показывает практика обработки результатов измерительных экспериментов, оказывается в подавляющем большинстве случаев оправданным. В этих случаях решается более узкая задача, состоящая в определении указанных числовых параметров $M[X]$ и σ . Поскольку на основе ограниченного статистического материала можно найти

только приближенные значения $M[X]$ и σ , их называют *оценками параметров* функции распределения случайной величины, а так как они выражаются одним числом, их называют также *точечными оценками*. Оценкой математического ожидания служит *среднее арифметическое*:

$$M[X] \approx \tilde{X} = \sum_{i=1}^n \frac{X_i}{n} \quad (3.3)$$

Для оценки *среднеквадратического а отклонения* используется формула

$$s \approx S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X})^2}{n-1}} \quad (3.4)$$

Оценку S приписывают каждому из n результатов наблюдений и называют *погрешностью единичного измерения, стандартным отклонением* или *стандартом*.

Таким образом, приведенные оценки являются случайными величинами. Если провести повторное измерение и по результатам его наблюдений вычислить \tilde{X} и S , то их значения будут отличаться от прежних. Повторяя измерения и вычисляя по результатам их наблюдений \tilde{X} и S или обрабатывая совместно наблюдения, полученные в предыдущих и последующих опытах, можно получить ряд значений \tilde{X} и S , которые также подчиняются нормальному закону распределения. Для оценки рассеяния этих распределений используют понятие *среднеквадратического отклонения среднего арифметического*, которое используют в качестве *оценки среднеквадратического отклонения результата измерения* и определяют по формуле

$$S(\tilde{X}) \approx \frac{S}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{X})^2}{n(n-1)}} \quad (3.5)$$

Из формулы видно, что оценка среднего квадратического отклонения результата измерения в \sqrt{n} раз меньше оценки среднеквадратического отклонения S результатов отдельных наблюдений.

Приведенные точечные оценки S , $S(\tilde{X})$ и рассмотренные понятия доверительного интервала и доверительной вероятности используются для определения *интервальной оценки* погрешности результата измерения. Причем для определения доверительного интервала при принятом или заданном значении доверительной вероятности P_D вместо нормального распределения, которое описывает поведение случайных величин при бесконечно большом числе наблюдений, используют *распределение Стьюдента*, или *t-распределение* (предложено английским статистиком Госсетом, публиковавшимся под псевдонимом «студент»), которое обеспечивает возможность

определения доверительных интервалов при ограниченном числе измерений. Границы доверительного интервала при этом определяются по формуле

$$y_{\Delta} = tS(\tilde{X}) \quad (3.6)$$

где t — коэффициент распределения Стьюдента, зависящий от задаваемой доверительной вероятности P_{Δ} и числа наблюдений n . Коэффициент t определяют по таблице (приложение 2) или рассчитывают по формуле, описывающей указанное распределение:

$$j(t, k) = \frac{[(k+1)/2]!}{\sqrt{pk} \cdot (k/2)!} \left(1 + \frac{t^2}{2}\right)^{\frac{k+1}{2}} \quad (3.7)$$

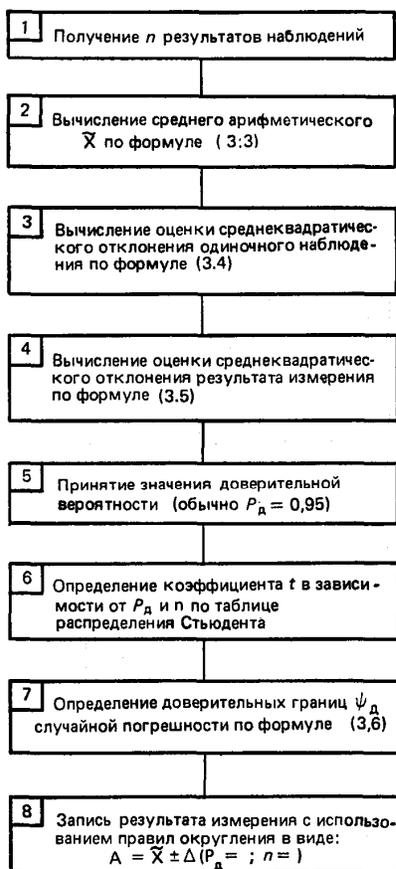


Рис. 3.1. Последовательность обработки экспериментальных данных прямых измерений с многократными наблюдениями

где $\varphi(t, k)$ — плотность распределения Стьюдента; k — величина, называемая степенью свободы и равная $n-1$.

Коэффициент t определяется дробью $(X-M[X])/S(X)$, которая называется дробью Стьюдента. При $n \rightarrow \infty$ (практически при $n \geq 20$) распределение Стьюдента приближается к нормальному.

Как отмечалось в § 1.4, случайные погрешности, не связанные с действиями оператора, проводящего измерение подразделяют на ожидаемые и грубые. Если в процессе измерений оператор обнаруживает, что результат одного или нескольких наблюдений резко отличается от остальных и определяет причину этого, то он должен отбросить этот результат (или результаты) и провести дополнительные наблюдения. Когда осуществляется обработка уже имеющегося материала и нет возможности учесть все условия, при которых выполнялся измерительный эксперимент, обнаружение

грубых погрешностей осуществляется методами проверки статистических гипотез. Основная концепция этих методов состоит в том, что проверяется гипотеза, утверждающая, что результат i -го наблюдения X_i не содержит грубой погрешности, т. е. является одним из значений случайной величины X с законом распределения $P(X)$ (обычно нормальным), оценки параметров которого \tilde{X} и S предварительно определены.

Для обнаружения в соответствии с этими методами грубых погрешностей используется ряд критериев (критерий Зс, Шовине, Романовского, Гребса) [9, 10].

Последовательность обработки экспериментальных данных для наиболее простого и типичного случая приведена на рис. 3.1. В данном случае предполагается, что наблюдения, получаемые при измерении, являются равнорассеянными (равноточными), т. е. представляют собой независимые, одинаково распределенные величины (такие результаты наблюдений получаются при выполнении измерений одним оператором с помощью одних и тех же средств измерений); результаты наблюдений являются исправленными, т. е. из них исключены систематические погрешности; неисключенные систематические погрешности настолько малы, что ими можно пренебречь; из результатов наблюдений исключены промахи и грубые погрешности; число наблюдений не превосходит 15 (в этом случае признается и не проверяется их принадлежность нормальному распределению).

На рис. 3.1 в п. 8 вместо доверительных границ случайной погрешности ψ_d записана суммарная погрешность измерения Δ [см. (1.8)], так как в рассматриваемом случае систематическая погрешность θ исключена, а неисключенная систематическая погрешность, описываемая выражением (3.2), мала. Если исключенной систематической погрешностью нельзя пренебречь, то общую погрешность измерения вычисляют по формуле [28]

$$\Delta = c \cdot S_{\Sigma} \quad (3.8)$$

где χ — коэффициент, зависящий от случайной и неисключенной систематической погрешности; S_{Σ} — оценка суммарного среднеквадратического отклонения результата измерения. Значения S_{Σ} и χ вычисляют по формулам:

$$S_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{k=1}^i \frac{q_k^2}{3} + S^2(\tilde{X})} \quad (3.9)$$

$$c = \frac{y_d + q}{S(\tilde{X}) + \sqrt{\sum_{k=1}^i \frac{q_k^2}{3}}} \quad (3.10)$$

§ 3.5. Оценивание результата и погрешности косвенных измерений с многократными наблюдениями

Искомое значение физической величины Y и оценка погрешности при косвенных измерениях (см. § 1.2) определяются на основании результатов измерений m аргументов $X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_m$, связанных с искомой величиной уравнением

$$Y=f(X_1, X_2, \dots, X_j, \dots, X_m) \quad (3.11)$$

Вид функции f должен быть известен из теоретических предпосылок или установлен экспериментально с погрешностью, которой можно пренебречь. Результаты измерений аргументов и оценки их погрешностей, как правило, получают путем проведения прямых измерений.

По виду функциональной зависимости (3.11) принято различать косвенные измерения с линейной и нелинейной зависимостями между измеряемой величиной и измеряемыми аргументами (или линейные и нелинейные косвенные измерения).

Обработка экспериментальных данных косвенных измерений базируется на использовании положений теории вероятностей и математической статистики [9, 10] о характеристиках функций случайных величин. В соответствии с этими положениями оценкой истинного значения физической величины Y , определяемой как функция случайных величин (аргументов), может служить ее значение \bar{Y} , полученное после выполнения вычислительных операций со средними арифметическими значениями $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_j, \dots, \tilde{X}_m$ аргументов в соответствии с этой функцией, т. е.

$$Y=f(\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_j, \dots, \tilde{X}_m) \quad (3.12)$$

При этом среднеквадратическое отклонение результата косвенного (линейного или нелинейного) измерения $S(\tilde{Y})$ в случае, когда величины — аргументы некоррелированы, т. е. не связаны между собой (наиболее важный для практики случай), определяют по формуле

$$S(\tilde{Y}) = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_j} \right)^2 S^2(\tilde{X}_j)} \quad (3.13)$$

где $S(\tilde{X}_j)$ — оценка среднеквадратического отклонения результата измерения j -го аргумента, определяемого путем обработки результатов прямого измерения его в последовательности, изложенной в § 3.4; $(\partial f / \partial X_j)S(\tilde{X}_j)$ — частные погрешности косвенного измерения.

Частные производные $\partial f / \partial X_j = E_j$ принято называть *коэффициентами влияния*, а формулу (3.13) — *формулой вероятностного, или статистического, суммирования*.

Относительную оценку среднеквадратического отклонения результата

косвенного измерения на основании (3.12) и (3.13) определяют по формуле

$$d(\tilde{Y}) = \frac{S(\tilde{Y})}{\tilde{Y}} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial X_j} \right)^2} S^2(\tilde{X}_j) \quad (3.14)$$

Так как

$$\frac{1}{f} \frac{\partial f}{\partial X_j} = \frac{\partial \ln f}{\partial X_j} \quad (3.15)$$

то (3.14) можно представить в виде

$$d(\tilde{Y}) = \frac{S(\tilde{Y})}{\tilde{Y}} = \sqrt{\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial \ln f}{\partial X_j} \right)^2} S^2(\tilde{X}_j) \quad (3.16)$$

В выражениях (3.13) — (3.16) значения частных производных $\frac{\partial f}{\partial X_j}$ и $\frac{\partial \ln f}{\partial X_j}$ вычисляют по значениям аргументов X_1, X_2, \dots, X_m соответственно равным $\tilde{X}_1, \tilde{X}_2, \dots, \tilde{X}_m$, т. е. по оценкам прямых измерений. Таким образом, эти величины определяют приближенно. В некоторых частных, но важных для практики случаях коэффициенты влияния могут быть определены точно. Рассмотрим эти случаи.

1. Функция $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_m)$ является линейной, т. е.

$$Y = \sum_{j=1}^m a_j X_j \quad (3.17)$$

где a_j — постоянные коэффициенты. Коэффициенты влияния

$$E_j = \frac{\partial f}{\partial X_j} = a_j \quad (3.18)$$

т. е. для абсолютных погрешностей коэффициенты влияния в данном случае равны коэффициентам перед переменными в линейной функции $E_j = a_j$. С учетом (3.18) выражение (3.13) преобразуем к виду:

$$S(\tilde{Y}) = \sqrt{\sum_{j=1}^m E_j^2 S^2(\tilde{X}_j)} \quad (3.19)$$

2. Функция $Y=f(X_1, X_2, \dots, X_m)$ — логарифмируема, т. е.

$$Y = X_1^{b_1} X_2^{b_2} \dots X_m^{b_m} = \prod_{j=1}^m X_j^{b_j} \quad (3.20)$$

В этом случае удобно использовать относительные погрешности. Из (3.15) получим

$$\frac{\partial \ln f}{\partial X_j} = \frac{\partial \ln \left(\prod_{j=1}^m X_j^{b_j} \right)}{\partial X_j} = \frac{\partial \left(\sum_{j=1}^m b_j \ln X_j \right)}{\partial X_j} = \frac{b_j}{X_j} \quad (3.21)$$

Для частной относительной погрешности [см. выражение (3.16)] получим

$$\frac{\partial \ln f}{\partial X_j} S(\tilde{X}_j) = \frac{b_j}{X_j} S(\tilde{X}_j) = b_j d(\tilde{X}_j) \quad (3.22)$$

где $d(\tilde{X}_j) = S(\tilde{X}_j) / \tilde{X}_j$ — оценка относительного среднеквадратического отклонения результата измерения аргумента X_j .

Как видно из (3.22), коэффициенты влияния для относительных погрешностей оказываются в данном случае равными показателям степени соответствующих аргументов $W_j = b_j$. Поэтому (3.16) можно представить в виде

$$g(\tilde{X}_j) = \frac{S(\tilde{Y}_j)}{\tilde{Y}_j} = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j^2 d^2(\tilde{X}_j)} \quad (3.23)$$

Если функция $f(X_1, X_2, \dots, X_m)$ сложная, то для определения оценки среднеквадратического отклонения результата косвенного измерения в ней выделяют отдельные зависимости — фрагменты, которые принимают за новые переменные

Z_1, Z_2, \dots, Z_i , и для них вычисляют оценки среднеквадратических отклонений результатов измерений. Это позволяет свести названную функцию относительно новых переменных к рассмотренным линейной или логарифмируемой функции и определить оценки среднеквадратического результата косвенного измерения (см. приложение 4).

Для определения интервальной оценки погрешности результата косвенного измерения, когда результаты наблюдений, полученные в процессе прямых измерений величин — аргументов, имеют нормальный закон распределения, используют распределение Стьюдента.

Доверительную границу случайной погрешности результата косвенного измерения вычисляют по формуле

$$y_d = tS(\tilde{Y}) \quad (3.24)$$

В выражении (3.24) коэффициент Стьюдента t определяется по таблице (см. приложение 2) для принятого или заданного значения доверительной вероятности и известного эффективного числа степеней свободы $K_{эф}$, которое определяется по формуле

$$K_{\text{эф}} = \frac{\left[\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_j} \right)^2 S^2(\tilde{X}_j) \right]^2 - 2 \left[\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_j} \right)^4 S^4(\tilde{X}_j) \frac{1}{n_j + 1} \right]}{\left[\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_j} \right)^4 S^4(\tilde{X}_j) \frac{1}{n_j + 1} \right]} \quad (3.25)$$

где n_j — число наблюдений, выполненное при измерении j -го аргумента.

Последовательность обработки экспериментальных данных косвенных измерений с многократными наблюдениями для некоррелированных величин приведена на рис. 3.2. Эта последовательность предусматривает, что для аргументов, получаемых путем прямых измерений, справедливы все

предположения, изложенные в § 3.4. На рис. 3.2 в п. 10 записана погрешность Δ вместо ψ_d , так как предполагается, что систематические погрешности полностью исключены. Число n указано, для того аргумента при измерении которого выполнено наименьшее число наблюдений. Для случая, когда значениями неисключенных систематических погрешностей нельзя пренебречь, разработана методика оценки суммарной погрешности [29], близкая к ранее приведенной для прямого измерения с многократным наблюдением.

При определении погрешности косвенного измерения важными являются установление частных погрешностей, которые в основном определяют погрешность косвенного измерения, и исключения из рассмотрения тех погрешностей, которые не оказывают на общую погрешность почти никакого влияния. Определение последних связано с процедурой округления результата измерения и оценки погрешности.

Если в выражении (3.13) какая-либо частная погрешность такова, что выполняется условие

$$s(\tilde{Y}) < 1.05 \sqrt{\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^m \left(\frac{\partial f}{\partial X_j} \right)^2 s^2(\tilde{X}_j)} \quad (3.26)$$

то этой частной погрешностью

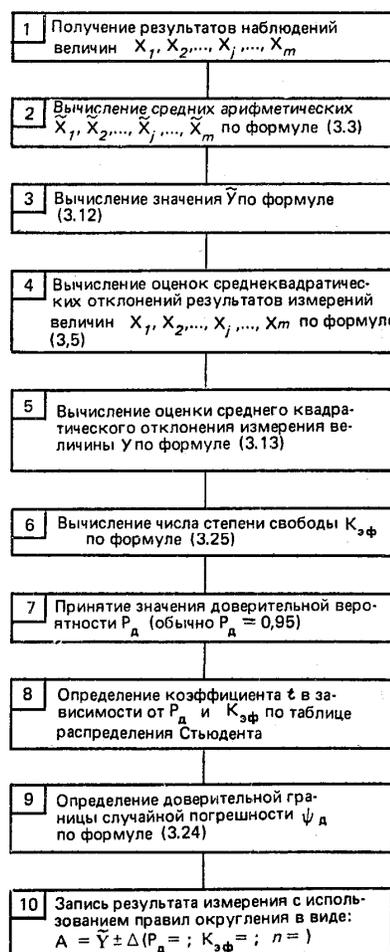


Рис. 3.2. Последовательность обработки экспериментальных данных косвенных измерений с многократными наблюдениями

можно пренебречь, так как при округлении уже число 1,0499... принимается за 1,0.

Из выражения (3.26) можно получить формулу [9] для вычисления k -й частной погрешности:

$$(\partial f / \partial X_k) S(\tilde{X}_k) < 0.3S(\tilde{Y}) \quad (3.27)$$

Это выражение называют *критерием ничтожности погрешности*. Погрешности, отвечающие этому критерию, называют *ничтожными* или *ничтожно малыми*, поэтому их не принимают во внимание при вычислении общей оценки погрешности косвенного измерения.

§ 3.6. Оценивание результатов и погрешностей совокупных и совместных измерений с многократными наблюдениями

В § 1.2 отмечалось, что при совокупных и совместных измерениях искомые величины находят из решения системы уравнений (1.7), которая связывает их с величинами, непосредственно измеряемыми. При этом измерения осуществляются так, что получаемое число уравнений превышает число искомых переменных. Для этого проводят многократные наблюдения одних и тех же физических величин в одинаковых или различных условиях (в зависимости от конкретной задачи). Результаты наблюдений для всех измеряемых в каждом эксперименте величин могут быть обработаны методами, изложенными в § 3.4, 3.5, а затем их результаты могут быть сгруппированы в систему уравнений, из решения которой могут быть найдены m физических величин, определяемых совокупными или совместными измерениями. Оценка значений этих m величин и их погрешностей при этом можно найти так же, как и для косвенных измерений.

В настоящее время для обработки экспериментальных данных при выполнении совместных и совокупных измерений в большинстве случаев применяют метод Лежандра, называемый *методом наименьших квадратов*.

Сущность этого метода состоит в следующем. Если в систему уравнений (1.7), записанную для краткости в виде

$$F(X_1, X_2, \dots, X_n, Y_1, Y_2, \dots, Y_m) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3.28)$$

подставить значения величин X_1, X_2, \dots, X_n , полученных как результаты наблюдений, то систему уравнений (3.28) можно преобразовать следующим образом:

$$F(Y_1, Y_2, \dots, Y_j, \dots, Y_m) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3.29)$$

Эта система содержит только искомые физические величины и постоянные коэффициенты. Число n равно общему числу наблюдений

измеряемых величин X_i (в том числе результаты повторных наблюдений одной и той же величины). Из-за ограниченной точности измерений величин X_i при числе наблюдений n , существенно большем числа неизвестных t , не представляется возможным найти такие значения неизвестных Y_j , при которых выполнялись бы все уравнения полученной системы. Поэтому задача сводится к нахождению для искомых величин Y_j их оценок \tilde{Y}_j , представляющих собой наилучшие приближения к истинным значениям. Уравнения (3.29) в отличие от обычных математических уравнений принято называть *условными*, так как подстановка в них найденных каким-либо путем значений оценок \tilde{Y}_j не обращает уравнение в нуль:

$$F_i(\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2, \dots, \tilde{Y}_j, \dots, \tilde{Y}_m) \neq 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3.30)$$

Чтобы эти уравнения превратились в тождества, их следует записать в виде

$$F_i(\tilde{Y}_1, \tilde{Y}_2, \dots, \tilde{Y}_j, \dots, \tilde{Y}_m) + u_i = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3.31)$$

Величины v_i принято называть *невязками*, или *остаточными погрешностями уравнений*.

Согласно методу наименьших квадратов, наилучшие оценки величин \tilde{Y}_j могут быть найдены в том случае, если функция Ω , представляющая собой сумму квадратов остаточных погрешностей условных уравнений, будет минимальна:

$$\Omega = \sum_{i=1}^n u_i^2 = \min \quad (3.32)$$

Суть метода наименьших квадратов может быть уяснена при рассмотрении определения параметров a и b линейной зависимости $\xi = a\varphi + b$. Пусть в результате экспериментальных исследований найдены пары значений ξ_i и φ_i (рис. 3.3).

В соответствии с методом наименьших квадратов для прямой, наилучшим образом проходящей относительно всех n точек, полученных в результате экспериментальных исследований значения, a и b должны быть выбраны такими, чтобы функция $\Omega = \sum_{i=1}^n u_i^2$ была минимальна.

Рассмотрим теперь последовательность обработки экспериментальных данных совокупных или совместных измерений для наиболее

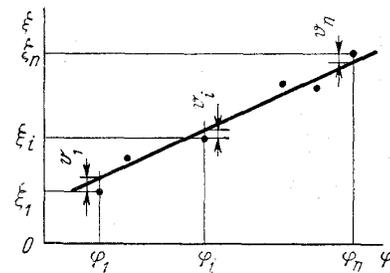


Рис. 3.3. График линейной зависимости, найденный методом наименьших квадратов

более важного случая, когда в систему (1.7) входят только линейные независимые уравнения:

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= k_{11}Y_1 + k_{12}Y_2 + \dots + k_{1m}Y_m \\ X_2 &= k_{21}Y_1 + k_{22}Y_2 + \dots + k_{2m}Y_m \\ \dots &\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ X_n &= k_{n1}Y_1 + k_{n2}Y_2 + \dots + k_{nm}Y_m \end{aligned} \right\} \quad (3.33)$$

где X_i ($i=1, 2, \dots, n$) — результаты наблюдений измеряемых физических величин; k_{ij} — известные коэффициенты; Y_j ($j=1, 2, \dots, m$) — искомые физические величины. Результаты наблюдений величины X_i — исправлены, равнорассеяны, некоррелированы и подчиняются нормальному закону распределения. Систему (3.33) можно записать в виде

$$X_i = \sum_{j=1}^m k_{ij}Y_j \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (3.34)$$

Если коэффициенты k_{ij} - в уравнениях (3.33) определены с такой малой погрешностью, что по сравнению с погрешностями измерений величин X_i ими можно пренебречь, то уравнение (3.33) считают точным.

Так как результаты наблюдений X_i содержат погрешность, то по аналогии с (3.31) для системы (3.34) запишем:

$$X_i = \sum_{j=1}^m k_{ij}\tilde{Y}_j + u_i \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (3.35)$$

Для каждой остаточной погрешности

$$u_i = X_i - \sum_{j=1}^m k_{ij}\tilde{Y}_j \quad (3.36)$$

Тогда для суммы квадратов остаточных погрешностей имеем

$$\Omega = \sum_{i=1}^n u_i^2 = \sum_{i=1}^n \left(X_i - \sum_{j=1}^m k_{ij}\tilde{Y}_j \right)^2 = \min \quad (3.37)$$

Для определения \tilde{Y}_j , удовлетворяющих условию (3.37), находят все частные производные функции Ω по Y_j , приравнивают их к нулю и получают тем самым новую систему из m уравнений:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial Y_j} = -2 \sum_{i=1}^n \left(X_i - \sum_{j=1}^m k_{ij}\tilde{Y}_j \right) k_{ij} = 0 \quad (j=1, 2, \dots, m) \quad (3.38)$$

Оценку среднеквадратического отклонения результата измерения величины Y_j определяют по формуле

$$S(\tilde{Y}_j) = \sqrt{\frac{D_{jj}S^2}{D}} \quad (3.43)$$

где D_{jj} — алгебраическое дополнение определителя D , получаемое путем удаления из него j -й строки и j -го столбца; S^2 — оценка дисперсии условных уравнений.

Для определения S^2 используют формулу

$$S^2 = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^n \left(X_i - \sum_{j=1}^m k_{ij} \tilde{Y}_j \right)^2 \quad (3.44)$$

Доверительные интервалы для истинных значений всех измеряемых величин получают на основе распределения Стьюдента при числе степеней свободы, равном $n-m$.

Если при совокупных или совместных измерениях условные уравнения нелинейны, то применяют их линеаризацию [9, 10].

§ 3.7. Результаты и погрешности измерений с однократными наблюдениями

Технологические измерения с однократными наблюдениями осуществляются с помощью систем автоматического контроля и имеют наиболее широкое применение в химико-технологических процессах. Для этих измерений при проектировании систем автоматического контроля практически полностью исключены методические погрешности, а личные сведены к минимуму. Таким образом, всеми погрешностями, кроме инструментальных, можно пренебречь, поэтому анализ составляющих погрешностей для таких измерений не проводится.

Прямые измерения. Результат прямого измерения записывают в виде

$$A = \bar{X} \pm \Delta(\bar{X}) \quad (3.45)$$

где \bar{X} — значение физической величины (оценка), найденное по шкале измерительного прибора; $\Delta(\bar{X})$ — абсолютная погрешность для найденного значения, определяемая классом точности средства измерений.

При оценке значения физической величины по шкале измерительного прибора необходимо учитывать тот факт, что число делений шкалы согласовано с классом точности измерительного прибора в соответствии с формулой (2.4). Поэтому нецелесообразно пытаться на глаз оценить доли деления и приводить их в результате измерения. Кроме того, при определении долей деления на глаз операторы допускают систематическую ошибку, достигающую до 0,2 деления.

По указанным причинам значение измеряемой величины должно быть считано по шкале с погрешностью в половину деления. При этом необходимо пользоваться правилами округления:

если указатель располагается в середине деления (рис. 3.4, а), слева (рис. 3.4, б) или справа (рис. 3.4, в) от нее, то в значении измеряемой величины указывается половина деления;

если указатель располагается вблизи отметки шкалы справа (рис. 3.4, г) или слева (рис. 3.4, д) от нее, то результат округляется до значения, соответствующего этой отметке.

Результаты, полученные с помощью однократных измерений, записывают выражениями вида (3.45) и в тех случаях, когда в показания используемого средства измерений необходимо вносить поправки [см. § 3.3]. В практике технологических измерений поправки обычно вносят в показания образцовых средств измерений. Только после внесения поправок, учитывающих систематическую погрешность указанных средств измерений и дополнительные погрешности от влияющих величин, погрешность $\Delta(\bar{X})$ в выражении (3.45) будет определяться классом точности образцового средства измерения.

При определении погрешностей измерений, выполняемых с помощью рабочих средств измерений, обычно вычисляют абсолютную и относительную погрешности. Первая нужна для определения результата и правильности записи, вторая — для сравнения его по точности с результатами других возможных измерений той же физической величины. Расчет абсолютной и относительной погрешностей осуществляется по паспортным данным средств измерений в зависимости от формулы, принятой для нормирования его класса точности.

Если погрешность средств измерений нормируется формулой (2.34), а за нормирующее значение принят диапазон измерений (например, диапазон измерений по входу $(X_B - X_H)$), то для приведенной погрешности

$$Y = 100\Delta / (X_B - X_H) = b \quad (3.46)$$

здесь b — паспортное значение класса точности средства измерений.

Абсолютная и относительная погрешности для результата измерения

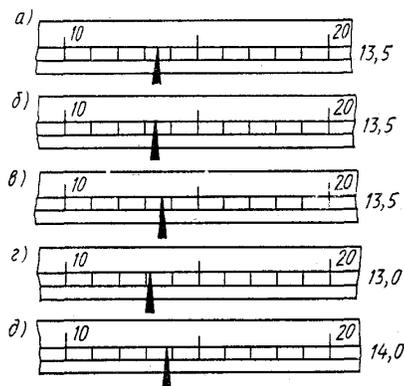


Рис. 3.4. Типичные случаи определения показаний измерительных приборов

\bar{X} с учетом (3.46) определяются соответственно выражениями:

$$\Delta(\bar{X}) = b(X_B - X_H) / 100 \quad (3.47)$$

$$d(\bar{X}) = \frac{\Delta(\bar{X})}{\bar{X}} 100 = \frac{b(X_B - X_H)}{\bar{X}} \quad (3.48)$$

$d(\bar{X})$ — относительная погрешность для найденного значения \bar{X} физической величины. При $X_H=0$ выражение (3.48) приобретает вид

$$d(\bar{X}) = bX_B / \bar{X} \quad (3.49)$$

Если погрешность средства измерений нормируется формулой (2.33) и в паспорте его указано значение класса точности, равное c , то абсолютная и относительная погрешности определяются соответственно выражениями:

$$\Delta(\bar{X}) = c\bar{X} / 100 \quad (3.50)$$

$$d(\bar{X}) = c \quad (3.51)$$

Косвенные измерения. Оценка результата косвенного измерения определяется на основе оценок аргументов, определяемых путем прямых измерений с однократными наблюдениями:

$$\bar{Y} = f(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_m) \quad (3.52)$$

Результат косвенного измерения записывают в виде

$$A = \bar{Y} \pm \Delta \quad (3.53)$$

где Δ — оценка погрешности косвенного измерения.

При определении оценок погрешностей косвенных измерений считают, что погрешности измерений аргументов являются случайными величинами, имеющими равномерный закон распределения. На этом основании предварительно находят абсолютные $\Delta(X_o)$ погрешности величин—аргументов по формуле (3.47) или (3.50), а затем, используя формулу вероятностного суммирования (3.13), определяют значение указанной оценки [10]:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{j=1}^m E_j^2 \Delta^2(\bar{X}_j)} \quad (3.54)$$

Относительную погрешность косвенных измерений вычисляют по формуле [10]:

$$d = \sqrt{\sum_{j=1}^m W_j^2 d^2(\bar{X}_j)} \quad (3.55)$$

Предварительно определив относительные погрешности $d(\bar{X}_j)$ величин-аргументов по уравнениям (3.48) или (3.51).

Совокупные и совместные измерения. Оценки результатов и погрешностей совокупных и совместных измерений в случае, когда эти измерения базируются на результатах однократных прямых измерений, могут быть найдены с помощью зависимостей, приведенных в § 3.6. Эти измерения в настоящее время еще не нашли широкого применения в автоматическом контроле технологических параметров. Используют только совокупные измерения в многопараметрических методах анализа состава многокомпонентных веществ (см. § 12.2). Обычно для концентраций определяемых компонентов смеси задача сводится к косвенному измерению [см. выражение (12.5)]. Поэтому для оценки результатов измерений и погрешностей могут быть использованы формулы (3.53) — (3.55).

§ 3.8. Методы повышения точности измерений и средств измерений

Повышение точности измерений — актуальная задача практически любых измерительных экспериментов. Для технологических измерений повышение точности измерений в настоящее время особенно важно в связи с переходом к широкому применению АСУ ТП, решающих задачи оптимизации технологических процессов. Задача повышения точности измерений неразрывно связана с задачей повышения точности измерительных устройств.

Для решения этих задач применяются различные методы [30, 31], сущность которых кратко изложена далее. В силу того, что в настоящее время отсутствуют общепринятая классификация методов повышения точности измерений и средств измерений, а также общая терминология, в книге используются классификация и терминология, приведенные на рис. 3.5 и 3.6.

В § 1.4 дан анализ причин возникновения случайной и систематической составляющих погрешностей измерения. Принципиальное различие в причинах их возникновения и проявления определяет, специфику методов уменьшения этих погрешностей.

Методы уменьшения случайной погрешности измерений. Для уменьшения случайной составляющей погрешности измерений увеличивают число наблюдений (см. рис. 3.5). Действительно, если следовать зависимости (3.5), то оценку среднеквадратического отклонения результата измерения, которая определяет собой случайную погрешность, теоретически можно сделать как угодно малой, увеличив число наблюдений n . Однако на практике в большинстве случаев трудно обеспечить постоянство самого объекта измерений в течение длительного времени, а это может при увеличении числа наблюдений n привести к увеличению погрешности, а не к ее уменьшению.

Другим методом повышения точности измерений за счет уменьшения случайной составляющей погрешности (см. рис. 3.5) является

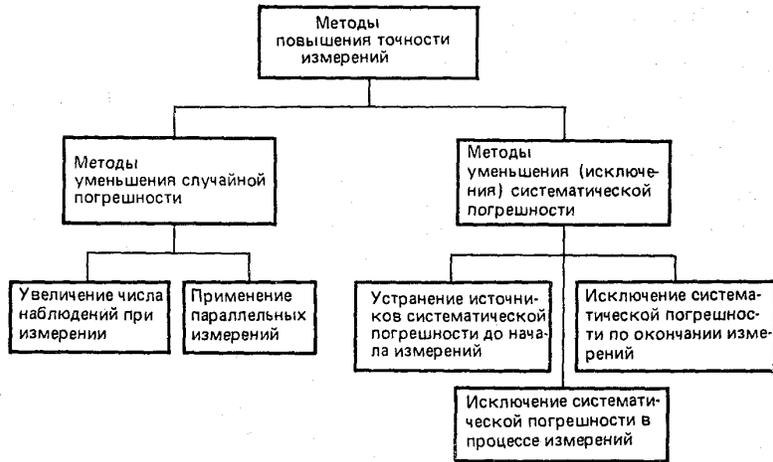


Рис. 3.5. Классификация методов повышения точности измерений

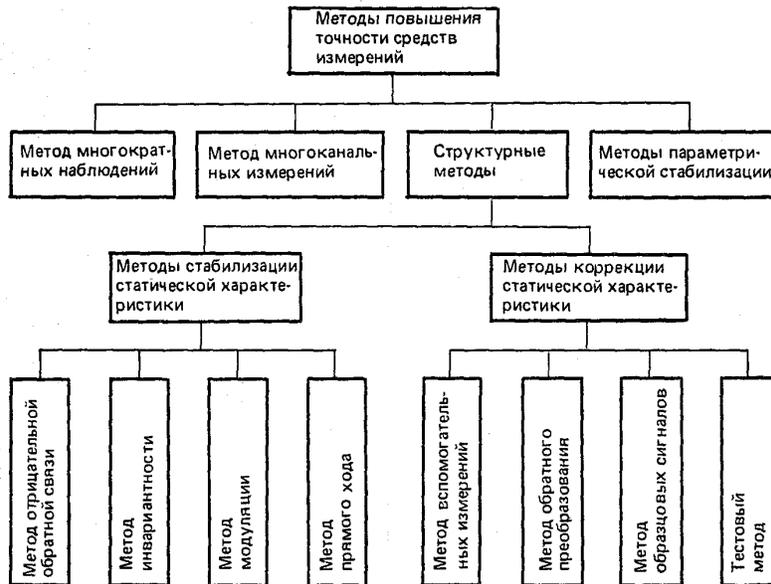


Рис. 3.6. Классификация методов повышения точности средств измерений

и той же физической величины. Для этого необходимо использовать сразу несколько средств измерений. Результаты наблюдений, полученных при этих измерениях, обрабатывают совместно Теоретическая основа этого метода та же, что и предыдущего метода.

Метод уменьшения (исключения) систематической погрешности. В § 6.6 были рассмотрены основные методы обнаружения и исключения систематической погрешности, а именно: методы основывающиеся на устранении источников систематической погрешности до начала измерений и методы исключения систематических погрешностей по окончании измерений. К числу последних относятся не только применение поправок и поправочных множителей, но и учет дополнительных погрешностей средств измерений

Кроме этих методов применяют методы, позволяющие определять и исключать систематическую погрешность в процессе измерения. Последние основываются на такой организации процесса измерения и обработки получаемой измерительной информации, которые обеспечивают исключение погрешности или ее определение. Причем применение таких методов возможно и целесообразно в тех случаях, когда известна природа исключаемой систематической погрешности. К числу этих методов относятся: метод замещения рассмотренный в § 1.3, метод компенсации погрешности по знаку и различные методы, базирующиеся на совместных или совокупных измерениях.

При использовании *метода компенсации погрешности по знаку* процесс измерения организуется таким образом, что известная известная систематическая входит в результат каждого из двух повторных измерения с противоположным знаком. Это позволяет после определения среднего арифметического значения исключить систематическую погрешность.

Сущность *методов, базирующихся на совместных или совокупных измерениях* применительно к уменьшению систематических погрешностей, состоит в том, что в процессе этих измерений изменяют параметр, отвечающий за возникновение систематической погрешности, или осуществляют измерение физической величины совместно и последовательно с несколькими вспомогательными мерами. В результате получают систему независимых уравнений, из решения которой определяют значения измеряемой физической величины уже с учетом систематической погрешности .

Одним из наиболее радикальных путей повышения точности измерений при прочих равных условиях является использование более точных средств измерений. Появление и развитие микроэлектронной техники и микропроцессоров, обеспечивающие возможность практически полной автоматизации самых сложных измерительных процессов, позволили использовать для увеличения точности средств измерений рассмотренные выше методы повышения точности измерений. Наряду с этими методами для повышения точности средств измерений применяется ряд традиционных методов.

При кратком рассмотрении методов повышения точности средств измерений будем следовать классификации, приведенной на рис. 3.6.

Метод многократных наблюдений используется для уменьшения случайной составляющей погрешности средства измерений и состоит в том, что: за некоторый постоянный интервал времени, отведенный для измерения, выполняют несколько наблюдений, затем с помощью вычислительного устройства, входящего в состав данного средства измерений, вычисляют среднее арифметическое значение измеряемой величины и оценку среднеквадратического отклонения результата измерения.

Метод многоканальных измерений аналогичен рассмотренному методу параллельных измерений (см. рис. 3.5). Средства измерений, с помощью которых реализуется данный метод, содержат несколько идентичных по характеристикам параллельных измерительных цепей (каналов) и вычислительное устройство. Последнее, получая измерительную информацию по этим каналам, вычисляет среднее арифметическое значение измеряемой величины и оценку среднеквадратического отклонения результата измерения. Такой метод позволяет уменьшить случайную составляющую погрешности средства измерений.

Метод параметрической стабилизации, называемый еще конструктивно-технологическим, состоит в стабилизации статической характеристики средств измерений. Параметрическая стабилизация реализуется путем изготовления средств измерений из точных и стабильных элементов, параметры которых мало подвержены внешним влияниям; термостабилизации; стабилизации параметров питания средств измерений; экранировки средств измерений от магнитных и электрических полей и т. п. Данный метод уменьшает систематическую и случайную погрешности средств измерений. Он является классическим в приборостроении. На основе этого метода до сих пор строится современный парк средств измерений.

Структурные методы основаны на том, что в состав средств измерений включаются дополнительные узлы, элементы и меры, обеспечивающие повышение точности этих средств измерений за счет информации, полученной с их помощью. Структурные методы повышения точности средств измерений подразделяют на методы, обеспечивающие стабилизацию статической характеристики средства измерений, и методы, основанные на коррекции этой характеристики.

Структурные методы стабилизации статической характеристики средств измерений (см. рис. 3.6).

Метод отрицательной обратной связи реализуем только при наличии преобразовательных элементов или преобразователей, способных осуществлять преобразование выходного сигнала средства измерений во входной (обратный преобразователь). Создание таких преобразователей — часто сложная техническая задача.

Сущность того метода подробно рассмотрена в § 2.2 (см. рис. 2.2). Применение данного метода обеспечивает уменьшение мультипликативной погрешности и погрешности нелинейности, а относительная аддитивная погрешность при этом не изменяется. В то же время использование метода приводит к уменьшению чувствительности средства измерения. Данный метод повышает точность средств измерения и наряду с методом параметрической стабилизации является наиболее распространенным (см. средства измерений, построенные по методу уравнивающего преобразования в гл. 4, 5, 7, 8, 10—12).

Метод инвариантности состоит в том, что в средстве измерений помимо измерительной цепи (канала) имеется сравнительная цепь (канал), к которой не подается входной сигнал, но которая, как и измерительная цепь, находится под воздействием некоторой влияющей величины. Причем параметры сравнительной цепи подобраны так, что изменение ее сигнала под действием влияющей величины идентично изменению сигнала измерительной цепи под действием этой величины, т. е. возмущения, вызванные влияющей величиной, поступают в средство измерений по двум каналам (принцип двух-канальности). Использование разности сигналов измерительной и сравнительной цепей (при дифференциальном включении этих цепей) обеспечивает независимость (инвариантность) результирующего сигнала от названной влияющей величины, т. е. метод обеспечивает исключение дополнительной погрешности, вызванной изменениями некоторой, как правило, основной влияющей величины. Данный метод давно и широко используется в аналитическом приборостроении (см. гл. 10—12).

Метод модуляции состоит в том, что сигнал, поступающий на вход средства измерений, или параметры этого средства измерений подвергаются принудительным периодическим изменениям (модуляции) с частотой, не совпадающей (обычно более высокой) с областью частот измеряемого сигнала. Использование метода модуляции позволяет уменьшить погрешности от сил трения, явлений поляризации и гистерезиса.

Метод прямого хода состоит в том, что измеряемый сигнал поступает к чувствительному элементу средства измерений через ключ, с помощью которого осуществляется периодическое во времени отключение измеряемого сигнала от чувствительного элемента и подача к последнему сигнала, значение которого равно нулю. Это обеспечивает работу средства измерений на восходящей ветви (прямой ход) статической характеристики (см. рис. 2.8) при всех значениях измеряемого сигнала, что исключает наиболее существенную погрешность многих средств измерений — погрешность от вариации.

Структурные методы коррекции статической характеристики (методы коррекции погрешности средств измерений) [30]. Перечень их приведен на рис. 3.6.

Метод вспомогательных измерений заключается в автоматизации

процесса учета дополнительной погрешности средства измерений по известным функциям влияния ряда влияющих величин. Для этого осуществляется измерение значений этих величин и с помощью вычислительного устройства, построенного с учетом названных функций влияния, автоматически корректируется выходной сигнал средства измерений.

Метод обратного преобразования (итерационный метод) [30, 31] базируется на использовании дополнительно в составе средства измерений кроме прямой измерительной цепи (прямого преобразователя), цепи, способной осуществлять обратное преобразование выходного сигнала (обратный преобразователь), имеющей существенно большую точность, чем цепь прямого преобразования. Результат измерения получают путем итераций. В процессе каждой итерации последовательно осуществляются: прямое преобразование измеряемой величины и запоминание результата, обратное преобразование запомненного значения этой величины, прямое преобразование сигнала обратного преобразователя, соответствующего запомненному значению измеряемой величины, и сравнение результатов этих двух преобразований, на основе которого формируется корректирующий сигнал. Обратный преобразователь в данном методе играет роль как бы многозначной меры, по которой корректируется статическая характеристика прямого преобразователя. Метод обратного преобразования позволяет уменьшать в зависимости от используемого алгоритма коррекции аддитивную и мультипликативную погрешности средств измерений.

Метод образцовых сигналов (образцовых мер) [30, 31] состоит в определении в каждом цикле измерения реальной функции преобразования средства измерений с помощью образцовых сигналов (мер), т. е. метод состоит в автоматической градуировке средства измерений в каждом цикле. Цикл включает в себя измерение физической величины, поступающей на вход средства измерения, поочередное измерение одной или нескольких мер, подключаемых вместо измеряемой физической величины на вход средства измерений, и решение системы уравнений с помощью вычислительного устройства, из которого определяется значение измеряемой физической величины. В этом решении уже учтены изменения реальной статической характеристики, т. е. данный метод сводится к совокупному измерению. Он позволяет уменьшить аддитивную и мультипликативную погрешность, а также погрешность нелинейности.

Тестовый метод [31] сводится к проведению совокупных измерений. В отличие от метода образцовых сигналов в тестовом методе в каждом цикле работы средства измерений кроме измерения физической величины, поступающей на вход средства измерений, осуществляют измерение величин-тестов, каждая из которых формируется из меры и измеряемой величины. Значение измеряемой величины определяется из системы уравнений, решаемой с помощью вычислительного устройства. По существу данный метод является развитием метода образцовых сигналов.

ГЛАВА 4 ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

§ 4.1. Общие сведения

Давлением называют отношение силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности. Давление — одна из основных величин, определяющих термодинамическое состояние веществ. Давлением во многом определяется ход технологического процесса, состояние технологических аппаратов и режимы их функционирования. С задачей измерения давления приходится сталкиваться при измерениях некоторых технологических параметров, например расхода газа или пара, при изменяющихся термодинамических параметрах, уровня жидкости, и др.

Различают следующие виды давления: атмосферное, абсолютное, избыточное и вакуум (разрежение).

Атмосферное (барометрическое) давление — давление, создаваемое массой воздушного столба земной атмосферы.

Абсолютное давление — давление, отсчитанное от абсолютного нуля. За начало отсчета абсолютного давления принимают давление внутри сосуда, из которого полностью откачан воздух.

Избыточное давление — разность между абсолютным и барометрическим давлениями.

Вакуум (разрежение) — разность между барометрическим и абсолютным давлениями.

В Международной системе единиц (СИ) за единицу давления принят паскаль (Па) — давление, создаваемое силой в 1 ньютон (Н), равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м^2 и направленной нормально к ней.

Разнообразие видов измеряемых давлений, а также областей их применения в технологии и научных исследованиях обусловило использование наряду с системной единицей давления и внесистемных единиц. К их числу относятся бар, миллиметр ртутного столба, килограмм-сила на квадратный сантиметр, килограмм-сила на квадратный метр, миллиметр водного столба. Соотношения единиц Давления, допущенных к применению, приведены в приложении 3.

Средства измерений давления классифицируют по виду измеряемого давления и принципу действия. По виду измеряемого давления средства измерений подразделяют на:

манометры избыточного давления — для измерения избыточного давления;

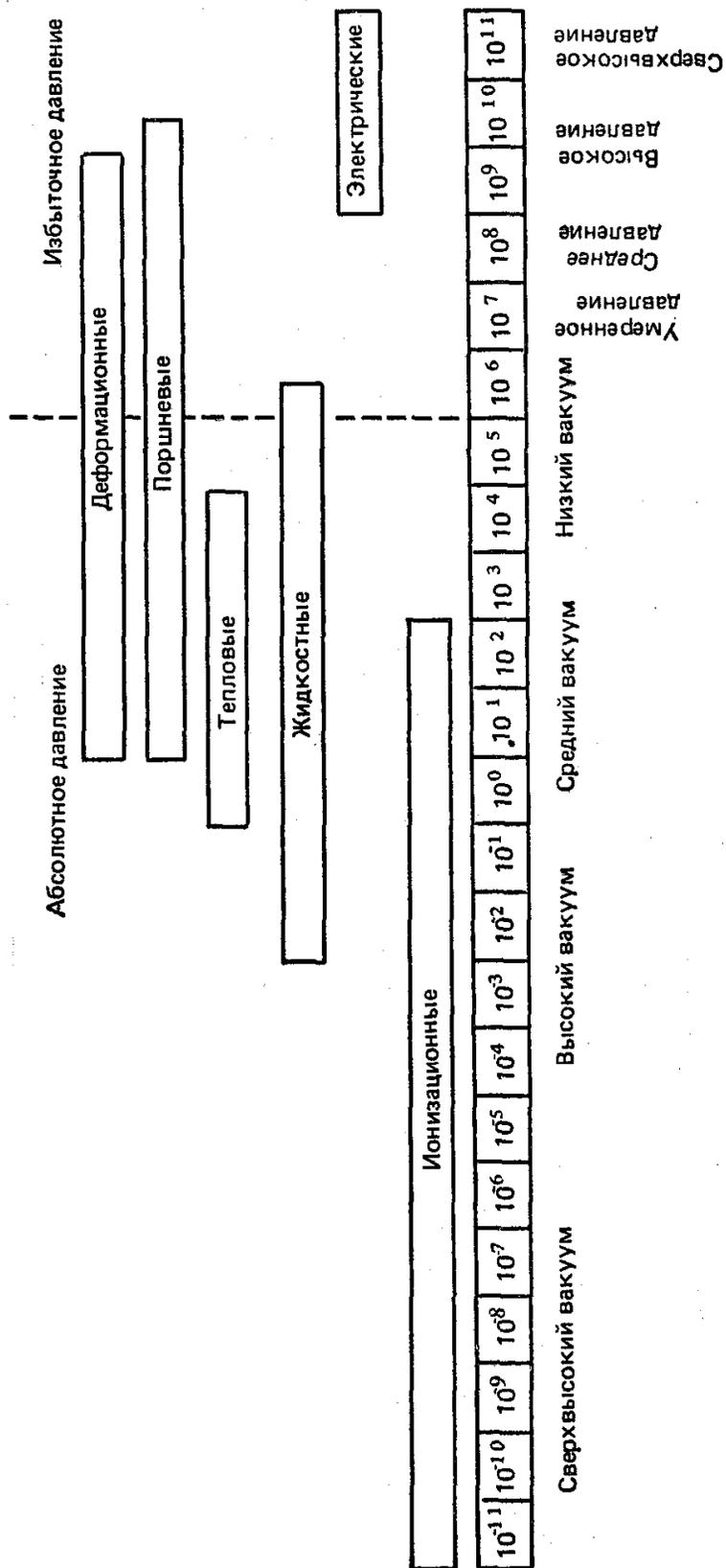


Рис.4.1. Диапазон давлений (в Па), охватываемый существующими средствами измерений давления

манометры абсолютного давления — для измерения давления, отсчитанного от абсолютного нуля;

барометры — для измерения атмосферного давления;

вакуумметры — для измерения вакуума (разрежения);

мановакуумметры — для измерения избыточного давления и вакуума (разрежения).

Кроме перечисленных средств измерений в практике измерений получили распространение:

напоромеры — манометры малых избыточных давлений (до 40 кПа);

тягомеры — вакуумметры с верхним пределом измерения не более — 40 кПа;

тягонапоромеры — мановакуумметры с диапазоном измерений + 20÷20 кПа;

вакуумметры остаточного давления — вакуумметры, предназначенные для измерения глубокого вакуума или остаточного давления, т. е. абсолютных давлений менее 200 Па;

дифференциальные манометры — средства измерений разности давлений.

По принципу действия средства измерений давления подразделяют на: жидкостные, поршневые, деформационные (пружинные), ионизационные, тепловые, электрические. Такое подразделение не является исчерпывающим и может быть дополнено средствами измерений, основанными на иных физических явлениях.

В настоящее время существует большой парк средств измерений давления, позволяющий осуществить измерение давления в диапазоне 10^{-12} — 10^{11} Па (рис. 4.1) [13].

Далее рассмотрены средства измерений давления, широко применяемые в качестве рабочих при технологических измерениях. Средства измерений, применяемые в качестве образцовых, рассмотрены в гл. 15.

§ 4.2. Жидкостные средства измерений давления с гидростатическим уравниванием

В жидкостных приборах с гидростатическим уравниванием мерой измеряемого давления является высота столба рабочей жидкости. В качестве рабочей жидкости, называемой затворной или манометрической, применяются дистиллированная вода, ртуть, этиловый спирт, трансформаторное масло. Выбор рода рабочей жидкости определяется диапазоном измеряемого давления, условиями эксплуатации и требуемой точностью измерений.

В настоящее время номенклатура жидкостных средств измерений Давления с гидростатическим уравниванием существенно ограничена. В большинстве случаев они заменены более совершенными деформационными средствами измерений. К числу жидкостных средств измерений давления (разности давлений и разрежения) с гидростатическим уравниванием, которые еще применяются на

технологических потоках, относятся поплавковые и колокольные дифманометры.

Поплавковые дифманометры. Принцип действия поплавковых дифманометров основан на уравнивании измеряемого перепада давления гидростатическим давлением, создаваемым столбом рабочей жидкости, заполняющей дифманометр. Поплавковый дифманометр (рис. 4.2, а) представляет собой два сообщающихся сосуда.

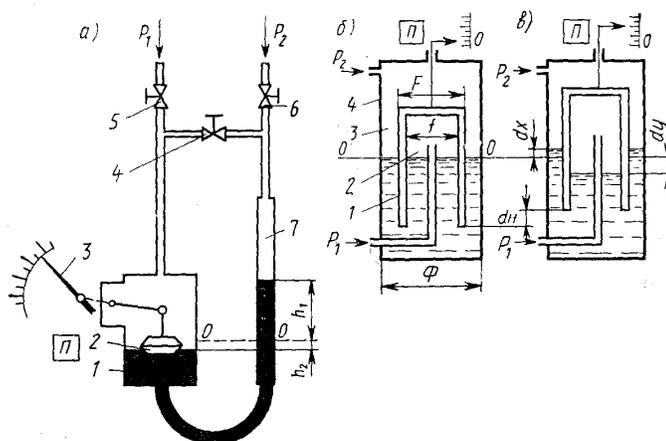


Рис. 4.2. Схемы жидкостных приборов для измерений давления

Площадь сечения F широкого сосуда 1 значительно больше площади сечения f узкого сосуда 7 . Внутренняя полость сообщающихся сосудов заполняется рабочей жидкостью (ртутью или трансформаторным маслом) до нулевой отметки. О значении измеряемой разности давлений в этих приборах судят по отсчетному устройству, указатель 3 которого связан с поплавком 2 , расположенным во внутренней полости широкого сосуда. При подключении прибора к объекту измерения большее давление подается в сосуд 1 , а меньшее — в сосуд 7 . Подача давления осуществляется через вентили 5 и 6 . Вентиль 4 служит для того, чтобы исключить возможность выброса рабочей жидкости при односторонней подаче давления. С этой целью перед подключением прибора к объекту вентиль 4 открывают, а после стабилизации давления в обоих сосудах закрывают. При отключении прибора от объекта необходимо предварительно открыть вентиль 4 , а затем закрыть вентили 5 и 6 .

В процессе измерения, жидкость в широком сосуде перемещается вниз, а вместе с ним перемещается поплавок 2 , который через механическую передачу перемещает указатель 3 отсчетного устройства. Перемещение поплавка будет происходить до тех пор, пока

измеряемая разность давлений $P_1 - P_2$ не уравновесится давлением столба жидкости высотой $h_1 + h_2$, т. е.

$$P_1 - P_2 = g(r_{ж} - r_c)(h_1 + h_2) \quad (4.1)$$

где g — местное ускорение свободного падения; h_1, h_2 — перемещение уровня жидкости в правом и левом коленах; $r_{ж}$ — плотность рабочей жидкости; r_c — плотность измеряемой среды.

Принимая во внимание равенство объема жидкости, вытесненного из широкого сосуда, объему жидкости, поступившему в узкий сосуд:

$$\Delta P_{ром} = \Delta P(1 - r_c / r_{ж}) \quad (4.2)$$

преобразуем уравнение (4.1):

$$h_2 = \frac{1}{(1 + Ff)(r_{ж} - r_c)}(P_1 - P_2) \quad (4.3)$$

Уравнение (4.3) представляет собой статическую характеристику поплавкового дифманометра, из которой следует: чтобы получать одинаковое перемещение h_z поплавка при измерении разности давлений в различных диапазонах, необходимо изменять отношение F/f . Практически это достигается заменой узкого сосуда одного диаметра на сосуд другого диаметра. Поплавковые дифманометры имеют несколько сменных сосудов (стаканов), замена которых позволяет изменять предельные номинальные перепады давления.

Для поплавковых дифманометров предельный номинальный перепад $\Delta P_{ном}$ связан с максимальным измеряемым перепадом $\Delta P = P_1 - P_2$ соотношением

$$\Delta P_{ром} = \Delta P(1 - r_c / r_{ж}) \quad (4.4)$$

где $r_{ж}, r_c$ — плотности рабочей жидкости и среды при температуре 20°C и атмосферном давлении.

Поплавковые дифманометры рассчитаны на номинальные перепады давления, верхние пределы которых ограничены значениями от 6,3 кПа до 0,10 МПа. Поплавковые дифманометры используются при статических давлениях измеряемой среды не более 25 МПа. Класс точности поплавковых дифманометров 1,0 и 1,5. Для передачи на расстояние информации о значении измеряемого перепада давления, рассматриваемые дифманометры оснащаются преобразователями Π перемещения указателя $З$ в унифицированный сигнал измерительной информации. Принцип действия и устройство преобразователей перемещения рассмотрен в гл. 5.

Передаточные механизмы поплавковых дифманометров, применяемых для измерения расхода веществ, оснащаются лекалами, профиль которых рассчитывают по квадратичной корневой зависимости. Показания этих поплавковых дифманометров пропорциональны измеряемому расходу.

Высокая точность измерений и возможность регистрации показаний без применения специальных источников энергии являются

преимуществами дифманометров данного типа. Основным их недостатком является наличие токсичной жидкости — ртути, которая при резких изменениях давления может загрязнять объект измерения или окружающую среду.

Колокольные дифманометры. Дифманометры этого типа представляют собой колокол, погруженный в рабочую жидкость и перемещающийся под влиянием разности давлений. Противодействующая сила создается за счет утяжеления колокола при его подъеме и уменьшении тяжести колокола при его погружении. Достигается это за счет изменения гидростатической подъемной силы, действующей на колокол согласно закону Архимеда. Принцип действия колокольного дифманометра поясняет рис. 4.2, б, в. Если давления в измерительных камерах 2 и 3 равны между собой, то колокол 1 находится в положении, показанном на рис. 4.2, б. Если перепад давлений на колоколе получает некоторое приращение $d(P_1 - P_2)$, то колокол всплывает. Всплытие происходит до тех пор, пока изменение подъемной силы от перепада давления на колокол и изменение гидростатической подъемной силы не уравниваются.

Для состояния равновесия, иллюстрируемого рис. 4.2, в, справедливы равенства [14]:

$$d(P_1 - P_2)F = (dH - dh)\Delta fg(r_{жс} - r_c) \quad (4.5)$$

$$dh = dy + dx \quad (4.6)$$

$$d(P_1 - P_2) = dhg(r_{жс} - r_c) \quad (4.7)$$

$$f dy = \Delta f dH + (\Phi - F) dx \quad (4.8)$$

где F — площадь внешнего поперечного сечения колокола; dH — перемещение колокола; dy — перемещение жидкости под колоколом; Δf — площадь поперечного сечения стенок колокола; $r_{жс}$, r_c — плотность рабочей жидкости и измеряемой среды; dh — разность уровней жидкости снаружи и внутри колокола; dx — перемещение жидкости в широком сосуде; Φ — площадь поперечного сечения широкого сосуда; f — внутренняя площадь поперечного сечения колокола. Решая совместно уравнения (4.5) — (4.8), получим зависимость

$$dH = \frac{f}{\Delta fg(r_{жс} - r_c)} d(P_1 - P_2) \quad (4.9)$$

которая после интегрирования в пределах от нуля до $P_1 - P_2$ преобразуется к виду

$$dH = \frac{f}{\Delta fg(r_{жс} - r_c)} (P_1 - P_2) \quad (4.10)$$

Уравнение (4.10) представляет собой статическую характеристику колокольного дифманометра с гидростатическим уравновешиванием. Для обеспечения измерения перепада давления в широком

диапазоне значение отношения $f/\Delta f$ должно быть по возможности уменьшено.

Колокольные дифманометры с гидростатическим уравниванием обладают высокой чувствительностью и могут быть использованы для измерения малых давлений, перепадов давлений и разрежений.

Некоторые модификации колокольных дифманометров с гидростатическим уравниванием оснащаются преобразователями Π , посредством которых перемещение поплавка преобразуется в унифицированный сигнал измерительной информации, передаваемый по каналу связи.

§ 4.3. Чувствительные элементы деформационных средств измерений давления

Принцип действия деформационных средств измерений давления основан на использовании упругой деформации чувствительного элемента (ЧЭ) или развиваемой им силы. Мерой измеряемого давления в средствах измерений данного вида является деформация упругого ЧЭ или развиваемая им сила. Различают три основные формы ЧЭ, получивших распространение в практике измерения: трубчатые пружины, сильфоны и мембраны.

Трубчатые пружины. Трубчатая пружина (манометрическая трубка, пружина Бурдона) — упругая криволинейная металлическая полая трубка, один из концов которой имеет возможность перемещаться, а другой — жестко закреплен. Трубчатые пружины используются в основном для преобразования измеряемого давления, поданного во внутреннее пространство пружины, в пропорциональное перемещение ее свободного конца. Наиболее распространена одновитковая трубчатая пружина, представляющая собой изогнутую по дуге окружности трубку с обычно овальным поперечным сечением (рис. 4.3, а).

Под влиянием поданного избыточного давления трубка раскручивается, а под действием разрежения скручивается. Такое направление перемещения трубки объясняется тем, что под влиянием внутреннего избыточного давления малая ось трубки (ось B) увеличивается, в то время как длина трубки остается постоянной. Теоретически длина трубки также изменяется, но эти изменения столь малы по сравнению с длиной, что на общее перемещение трубки оно не оказывает существенного влияния.

Для тонкостенных трубок изменение центрального угла трубки под действием

$$dg = Pg \frac{1 - \mu^2}{E} \frac{R^2}{bh} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{a}{b + \kappa^2} \quad (4.11)$$

где γ — центральный угол трубки; μ — коэффициент Пуассона; E — Модуль упругости материала трубки; R — радиус кривизны центральной

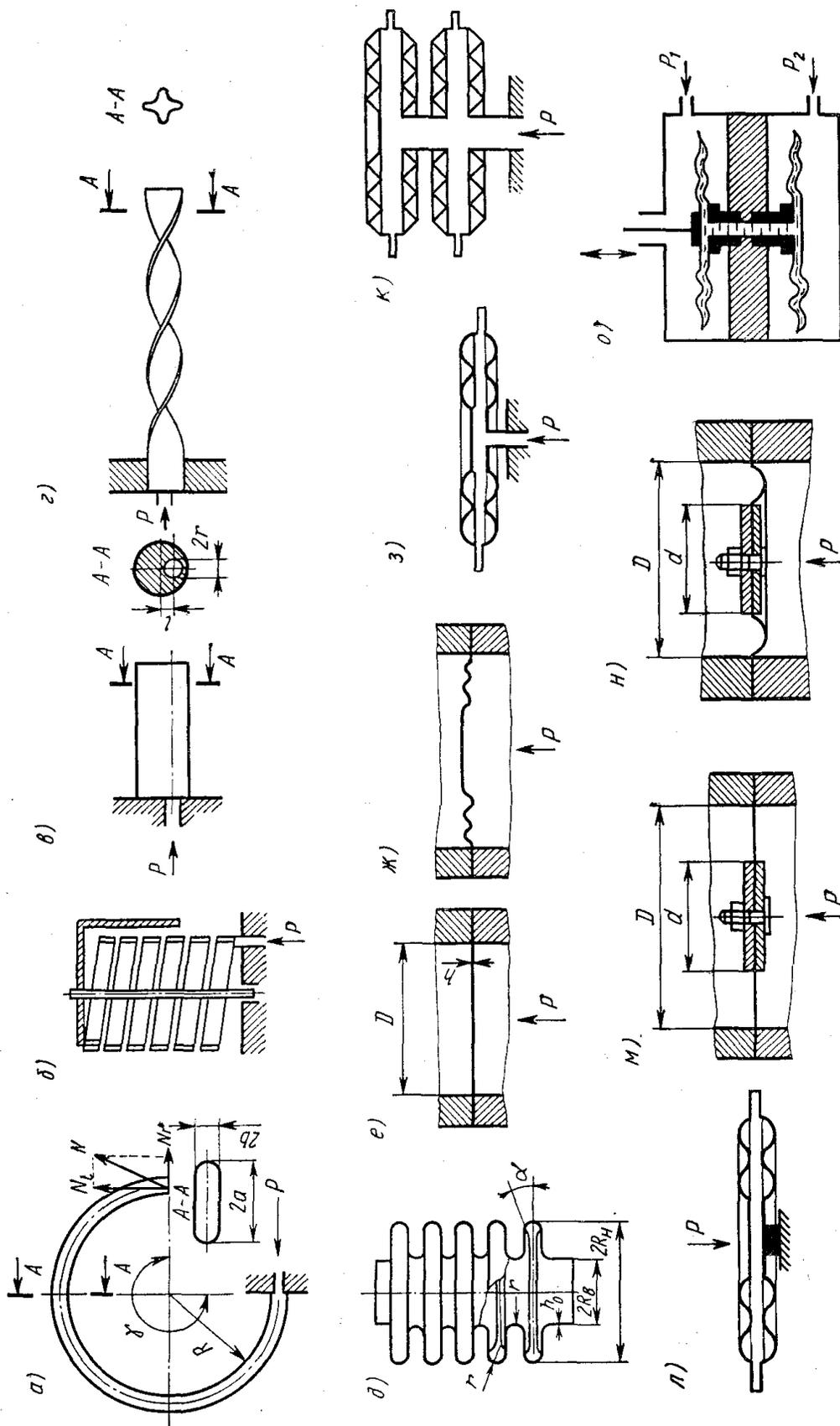


Рис. 4.3. Конструкции чувствительных элементов деформационных средств измерений давления

оси трубки (центральная ось — геометрическое место центров тяжести поперечных сечений); h — толщина стенки; a и b — большая и малая полуоси овального сечения, измеренные по среднему контуру; α и β — эмпирические коэффициенты, зависящие от формы поперечного сечения трубки; $\aleph = Rh/a^2$ — главный параметр трубки. Составляющая сила в направлении касательной к оси на свободном конце тонкостенной трубки (у тонкостенных трубок отношение $h/b = 0,6 \div 0,7$) может быть найдена из выражения

$$N_t = Pab \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \frac{48S}{e + \aleph^2} \frac{g - \sin g}{3g - 4 \sin g + \sin g \cos g} \quad (4.12)$$

Сила в радиальном направлении

$$N_r = Pab \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) \frac{48S}{e + \aleph^2} \frac{g - \cos g}{3g - \sin g \cos g} \quad (4.13)$$

где S и ε — коэффициенты, зависящие от отношения b/a .

В уравнениях (4.12) и (4.13) все величины, за исключением P , постоянные. Поэтому для трубчатой пружины справедливо равенство

$$N = kP \quad (4.14)$$

где $k = f(a; b; h; R; \gamma)$.

Как следует из приведенных зависимостей, путем изменения a/b , R , h и γ можно изменять величины $\Delta\gamma$ и N , а следовательно, и чувствительность измерения.

Практически увеличение u достигается путем увеличения числа витков трубчатой пружины. На рис. 4.3, б показана винтовая n -витковая трубчатая пружина. Величина u в чувствительных элементах этой формы равна $360^\circ n$.

Для измерения высоких давлений до 1000 МПа используют криволинейные и прямолинейные трубчатые пружины. Форма сечения прямолинейной трубчатой пружины показана на рис. 4.3, в. Перемещение свободного конца пружины происходит не из-за изменения поперечного сечения, а благодаря изгибающему моменту

$$M = \pi r^2 l P \quad (4.15)$$

где πr^2 — площадь канала; l — расстояние от центра канала до центра тяжести; P — измеряемое избыточное давление, направленное в сторону более толстой стенки.

Основной недостаток рассмотренных пружин — малый угол поворота, что требует применения передаточных механизмов. Этот недостаток устранен в чувствительных элементах типа витой трубчатой пружины овального или звездчатого сечения (рис. 4.3, г). Угол поворота такой витой пружины составляет 40 — 60° . Это позволяет отказаться от применения передаточного механизма, так как стрелка может быть укреплена непосредственно на свободном конце пружины. Трубчатые пружины для давлений до 5 МПа изготавливают

из латуни, томпака, бронзы; для изготовления пружин, рассчитанных на давления свыше 5 МПа, применяют легированные сплавы, стали различных составов. Для давлений 1000 МПа и более применяют легированную сталь типа 50 ХФА.

Сильфоны. Сильфон — тонкостенная цилиндрическая оболочка с поперечными гофрами (рис. 4.3, *д*), способная получать значительные перемещения под действием давления или силы. В пределах линейности статической характеристики сильфона отношение действующей на него силы к вызванной ею деформации остается постоянным и называется *жесткостью* сильфона. Для увеличения жесткости внутри сильфона часто помещают пружину. Сильфоны изготавливают из бронзы различных марок, полутомпака, углеродистой стали, нержавеющей стали, алюминиевых сплавов и др. Серийно производят бесшовные и сварные сильфоны диаметром от 8—10 до 80—100 мм и толщиной стенки 0,1—0,3 мм.

Осевое перемещение b дна сильфона под действием осевой силы N определяют по формуле

$$d = N \frac{1 - m^2}{Eh_0} \frac{n}{A_0 - aA_1 + a^2 A_2 + B_0 h / R_b^2} \quad (4.16)$$

где h_0 — толщина стенки на внутреннем диаметре (принимают равной толщине трубки, из которой изготавливают сильфон); n — число рабочих гофров; a — угол уплотнения; A_0, A_1, A_2, B_0 — коэффициенты, зависящие от отношений R_H/R_B и r/R_B (R_H и R_B — наружный и внутренний радиусы сильфона; r — радиус закругления гофров по средней линии контура).

Осевую силу можно определить, зная разность давлений ΔP , действующую на сильфон, т. е. $N = \Delta P F_{\text{эф}}$, где $F_{\text{эф}} = \pi (R_H + R_B)^2 / 4$ — эффективная площадь сильфона, которая при значительных перемещениях дна сильфона остается практически постоянной.

Мембраны. Различают упругие и эластичные (вялые) мембраны. *Упругая мембрана* — гибкая круглая плоская (плоская мембрана) или гофрированная (гофрированная мембрана) пластина, способная получить прогиб под действием давления (рис. 4.3, *е, ж*). Статическая характеристика плоских мембран изменяется нелинейно с увеличением давления, поэтому здесь в качестве рабочего участка используют небольшую часть возможного хода. Гофрированные мембраны могут применяться при больших прогибах, чем плоские, так как имеют значительно меньшую нелинейность характеристики. Мембраны изготавливают из различных марок стали, бронзы, томпака, латуни и т. д.

Величина прогиба δ центра плоской мембраны, закрепленной по контуру, при малых перемещениях под действием давления P равна

$$d = \frac{3(1 - m^2) PR^4}{16 Eh^3} \quad (4.17)$$

где R — рабочий радиус мембраны (по контуру закрепления); h — толщина мембраны.

Величину прогиба δ гофрированных мембран определяют из выражения $a = \delta/h + b\delta^3/h^3 = PR^4/(Eh^4)$, где a и b — коэффициенты, зависящие от формы профиля мембраны и ее толщины.

Гофры применяются треугольной, трапециевидной, синусоидальной и круговой форм. При необходимости получения большего прогиба используют соединение мембран в виде *мембранных коробок* (рис. 4.3, з), а также блоки, собранные из нескольких мембранных коробок (рис. 4.3, к).

Глубина гофр оказывает существенное влияние на линейность статической характеристики. Чем больше глубина гофр, тем линейность статической характеристики выше.

При измерении атмосферного (барометрического) давления получили распространение гофрированные мембранные коробки, из внутренней полости которой воздух удален (рис. 4.3, л).

Эластичная мембрана, предназначенная для измерения малых давлений и разности давлений, представляет собой зажатые между фланцами плоские или гофрированные диски, выполненные из прорезиненной ткани, тефлона и др.

Плоские и гофрированные эластичные мембраны предназначены в основном для создания достаточных перестановочных усилий при сравнительно небольших перемещениях.

Перестановочное усилие эластичной мембраны зависит от ее эффективной площади, которая при умножении на перепад давления создает усилие, приложенное к геометрическому центру мембраны.

Эффективная площадь плоской эластичной мембраны, зажатой между фланцами, при малом прогибе мембраны приближенно равна $1/3$ ее полной геометрической площади (остальные $2/3$ площади передают усилие к опоре), т. е. $F_{эф} = \pi D^2/12$, где D — диаметр опоры мембраны. Перестановочное усилие, создаваемое такой мембраной:

$$N = PF_{эф} = P \frac{\pi D^2}{12} \quad (4.18)$$

В большинстве случаев используют лишь часть максимально возможного хода мембраны (до 10 %). При большом ходе мембраны связь между усилием N и ходом центра мембраны нелинейна. Для уменьшения нелинейности и увеличения перестановочного усилия применяют эластичные мембраны с жестким центром, представляющим собой два металлических диска, закрепленных с двух сторон на мембране; оставшаяся свободная часть мембраны между дисками жесткого центра и заделкой по периферии образует эластичное мембранное кольцо

Усилие, создаваемое мембраной с жестким центром под действием давления P ,

$$N = \frac{p(D^2 + Dd + d^2)}{12} P \quad (4.19)$$

где D — диаметр мембраны; d — диаметр жесткого центра.

На рис. 4.3, м, я показаны типы эластичных мембран. При измерении перепада давления необходимо, чтобы при воздействии односторонних перегрузок на чувствительный элемент не происходило его повреждения.

Применение мембранных блоков с жидкостным заполнением (рис. 4.3, о) позволяет решить эту задачу. При односторонней перегрузке, когда разность давлений $P_1 - P_2$ больше верхнего предела измерений, на который рассчитан чувствительный элемент, повреждение коробки не происходит, так как мембраны складываются по профилю, а жидкость перетекает во вторую коробку.

Одной из основных характеристик деформационного чувствительного элемента является зависимость перемещения δ рабочей точки от действующего давления P или разности давлений. Эта характеристика $\delta = f(P)$, называемая статической, может быть линейной или нелинейной. Ход статической характеристики в пределах упругой деформации неоднозначен и образует петлю гистерезиса. Значение гистерезиса определяет систематическую погрешность деформационных средств измерений.

Кроме отмеченного недостатка чувствительным элементам присуще свойство *упругого последействия*, суть которого состоит в том, что после прекращения изменения давления деформация продолжает уменьшаться, асимптотически приближаясь к предельному значению. Наряду с упругим последействием при эксплуатации чувствительных элементов имеет место *остаточная деформация*, заключающаяся в том, что после снятия давления чувствительный элемент не возвращается в исходное положение. При многократных измерениях остаточная деформация накапливается, что приводит к значительным погрешностям.

Изложенные особенности деформационных чувствительных элементов объясняют тот факт, что для технических манометров верхний предел измерений ограничивается половиной давления, соответствующего пределу пропорциональности статической характеристики, в то время как для образцовых приборов предел измерений ограничивается четвертой частью давления, соответствующего пределу пропорциональности.

§ 4.4. Деформационные приборы для измерения давления

Высокая точность, простота конструкции, надежность и низкая стоимость являются основными факторами, обуславливающими широкое распространение деформационных приборов для измерения давления в промышленности и научных исследованиях.

Измерительные приборы с одновитковой трубчатой пружиной.

Эти приборы предназначены для измерения избыточного давления и разрежения неагрессивных жидких и газообразных сред.

Приборы этого типа выпускаются только показывающие в обыкновенном, виброустойчивом, антикоррозионном, пыле-, брызго- и взрывозащищенном исполнениях.

Для передачи перемещения свободного конца деформационного ЧЭ к указателю манометра используют секторные и рычажные передаточные механизмы. С помощью передаточного механизма перемещение свободного конца трубчатой пружины в несколько градусов или миллиметров преобразуется в угловое перемещение стрелки на $270\text{—}300^\circ$.

Рычажный передаточный механизм применяется в тех случаях, когда от манометра не требуется высокая точность измерения и он подвергается вибрации. Секторный передаточный механизм применяется в образцовых приборах и в приборах, где по условиям эксплуатации исключена вибрация.

На рис. 4.4 показана конструкция манометра с секторным передаточным механизмом. Прибор состоит из трубчатой пружины 5, один конец которой впаян в отверстие держателя 1, а другой (подвижный) конец наглухо запаян и несет на себе наконечник 10. Полость пружины связана с измеряемой средой через канал в держателе 1, снабженном радиальным штуцером 14. Держатель прибора оснащен платой 2, на которой монтируется трибно-секторный механизм. Последний включает зубчатое колесо (трибку) 8 и зубчатый сектор 9. Для исключения люфта в передаточном механизме используется спиральная пружина 7, один конец которой с помощью штифта крепится на оси трибки, а другой — к колонке 6, укрепленной на плате 2. К хвостовику сектора 9 с помощью винта 12 крепится тяга 11. Посредством тяги перемещение свободного конца пружины передается зубчатому сектору, который имеет ось вращения 13. Вращение зубчатого сектора

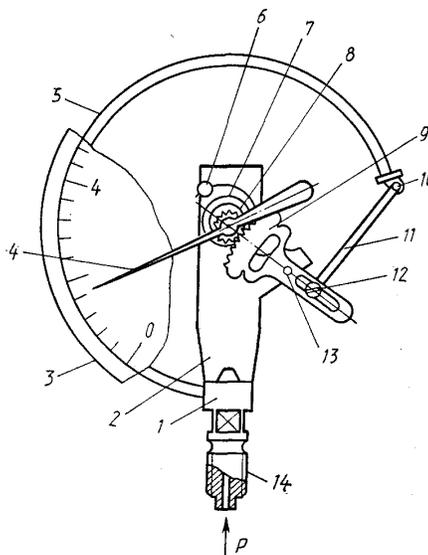


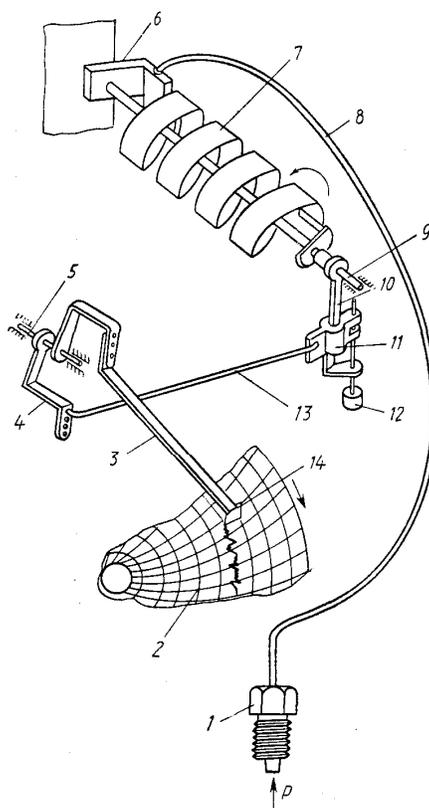
Рис. 4.4. Схема манометра с одновитковой трубчатой пружиной

передается трибке, на оси которой насажена стрелка 4 для отсчета показаний на шкале 3. Шкала манометра равномерная, так как перемещение свободного конца пружины пропорционально измеряемому давлению. Регулировка хода стрелки производится винтом 12.

Вакуумметр с одновитковой трубчатой пружиной конструктивно идентичен рассмотренному манометру. Отличие состоит только в шкале и направлении перемещения стрелки. В вакуумметрах перемещение стрелки может происходить как по часовой стрелке, так и против. Отличительной особенностью мановакуумметра является шкала, которая выполняется с нулем в средней части. Шкала, расположенная слева от нуля, служит для измерения вакуума, а шкала, расположенная справа,— для измерения избыточного давления.

Диапазоны измерений манометров $0-0,1$ МПа до $0-10^3$ МПа; вакуумметров— от $-0,1$ до 0 МПа. Классы точности приборов: 0,4(0,5); 0,6; 1,0; 1,5(1,6); 2,5; 4,0.

Наряду с рассмотренными приборами, оснащенными одинаковой трубчатой пружиной, в практике измерения давления и разрежения получили широкое распространение манометры и вакуумметры, снабженные электроконтактными сигнализирующими устройствами. Эти средства измерений давления получили название электроконтактных. Класс точности электроконтактных манометров и вакуумметров 1,5. Погрешность срабатывания сигнализирующего устройства $\pm 2,5\%$.



от

Рис. 4.5. Схема самопишущего манометра с многовитковой трубчатой пружиной

Измерительные приборы с многовитковой трубчатой пружиной. Благодаря большому числу витков, перемещение свободного конца многовитковой трубчатой пружины и развиваемые ею усилия достигают значений, позволяющих осуществлять показания и запись измеряемого давления или разрежения. На рис. 4.5 показана схема манометра с многовитковой трубчатой пружиной. Измеряемое давление через штуцер 1 по капилляру 8 подается во внутреннюю полость многовитковой трубчатой пружины 7. Один конец пружины прикреплен к кронштейну 6, а другой — соединен с осью 9. Под действием давления пружина раскручивается, что сопровождается вращением оси 9 и находящегося на ней рычага 10, вращение которого через тягу 13 передается рычагу 4, находящемуся на одной оси 5 со стрелкой 3. На конце стрелки укреплено перо 14, перемещающееся по дисковой диаграмме 2, вращение которой осуществляется электродвигателем или часовым механизмом. Для регулировки размаха стрелки предусмотрен ползун 11с винтом 12. Класс точности показывающих и самопишущих приборов с многовитковой трубчатой пружиной 1,0; 1,5. Диапазоны измерений манометров от 0—0,6 МПа до 0—160 МПа; вакуумметров—от —0,06—0 МПа до—0,1—0 МПа.

Измерительные приборы с сифонным чувствительным элементом. Приборы этого типа предназначены для измерения избыточного давления, разрежения и разности давлений. Их выполняют показывающими и самопишущими. Схема самопишущего сифонного манометра показана на рис. 4.6. Измеряемое давление через штуцер 11 подается в камеру 10, где расположен деформационный чувствительный элемент — сифон 9. Для

увеличения жесткости сиффона внутри него расположена винтовая пружина 8. Под действием давления сиффон деформируется и дно его поднимает шток 7, жестко связанный с двухплечим рычагом 6, последний через систему рычагов 5, 4, 3 поворачивает ось

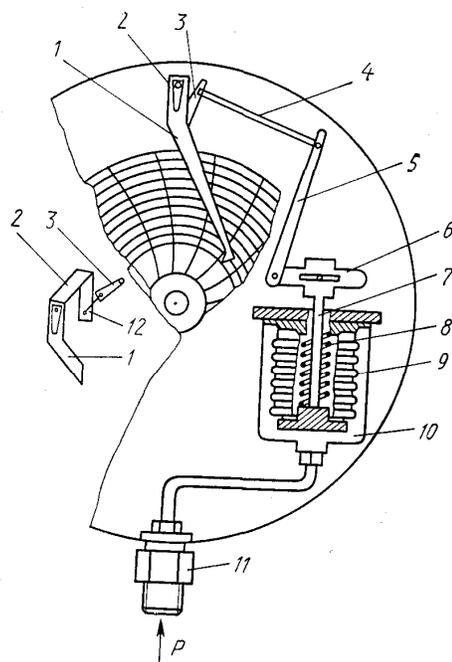
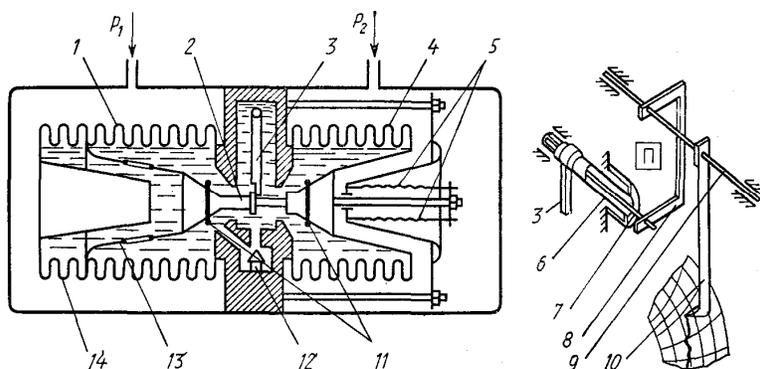


Рис. 4.6. Схема самопишущего сифонного манометра

12 и укрепленный на ней П-образный рычаг 2. К П-образному рычагу прикреплена стрелка 1 с пером. Запись измеряемого давления производится на дисковой диаграмме, привод которой осуществляется с помощью синхронного двигателя или часового механизма. Верхний предел измерений сильфонных приборов ограничен давлениями 0,025—0,4 МПа. Классы точности сильфонных манометров избыточного давления, вакуумметров и мановакуумметров: 1,5; 2,5. Для измерения разности давлений и расхода жидких и газообразных сред широкое применение получили сильфонные дифманометры.



На рис. 4.7 показана схема сильфонного дифманометра.

Под действием измеряемого перепада давления рабочий сильфон 1, расположенный в плюсовой камере (камера, в которую подается большее давление), сжимается, что приводит к вытеснению рабочей жидкости, заполняющей внутреннюю полость дифманометра, во внутреннюю полость рабочего сильфона 4. Деформация сильфонов вызывает перемещение штока 2 и изменение натяга противодействующих пружин 5. Перемещение штока прекращается, когда усилие деформации сильфонов уравнивается усилием натяга противодействующих пружин. В процессе перемещения штока 2 последний поворачивает рычаг 3 против часовой стрелки, который закручивает торсионную трубку 6. Одновременно с торсионной трубкой поворачивается ось 7, жестко связанная с рычагом 8. Перемещение рычага 8 передается оси 9, на которой укреплен стрелка 10.

С целью исключения влияния изменения температуры окружающего воздуха на показания прибора последний снабжен температурным компенсатором, выполненным в виде трех дополнительных гофр 14. Внутренние полости термокомпенсатора и сильфона соединены между собой отверстиями в разделительном стакане 13.

В процессе термокомпенсации жидкость из полости термокомпенсатора перетекает в полость рабочего сильфона. Резиновые кольца *11* служат для герметизации полостей рабочих сильфонов, когда один из сильфонов находится под воздействием односторонней перегрузки. Это позволяет предохранить сильфоны от разрушения. Клапан *12* регулирует скорость перетекания жидкости из полостей рабочих сильфонов и тем самым степень успокоения указателя прибора. Для передачи на расстояние показаний сильфонных дифманометров последние оснащаются преобразователями *Я* перемещения в унифицированный токовый или пневматический сигнал. Подробно устройство и работа преобразователей рассмотрены в гл. 5. Предельные номинальные перепады давлений составляют 0,0063—0,25 МПа. Предельное допустимое рабочее избыточное давление: 6,3; 16 и 32 МПа. Классы точности сильфонных показывающих и самопишущих дифманометров 1,0 и 1,5.

Измерительные приборы с мембранным чувствительным элементом. Эти приборы предназначены для измерения атмосферного и избыточного давлений и разрежения. Из-за малости усилий, развиваемых деформационным чувствительным элементом, мембранные приборы выпускаются в основном показывающими. Принцип действия приборов состоит в преобразовании измеряемого давления или разрежения в перемещение жесткого центра мембранного чувствительного элемента, которое с помощью передаточного триб-ко-секторного механизма преобразуется во вращательное движение указателя. Максимальный диапазон измерений мембранных манометров 0—2,5 МПа, вакуумметров — от —0,1 до 0 МПа. Классы точности приборов 1,5 и 2,5. Кроме рассмотренных приборов выпускаются показывающие мембранные тягомеры, напоромеры и тягонапоромеры классов точности 1,5; 2,5.

§ 4.5. Деформационные измерительные преобразователи давления, основанные на методе прямого преобразования

Выпускаемые в настоящее время измерительные преобразователи давления, основанные на методе прямого преобразования, различаются как видом деформационного чувствительного элемента, так и способом преобразования его перемещения или развиваемого им усилия в сигнал измерительной информации. Для преобразования перемещения чувствительного элемента в сигнал измерительной информации широко применяются индуктивные, дифференциально-трансформаторные, емкостные, тензорезисторные и другие преобразовательные элементы. Преобразование усилия, развиваемого чувствительным элементом, в сигнал измерительной информации осуществляется пьезоэлектрическими преобразовательными элементами.

Индуктивные измерительные преобразователи давления. На рис. 4.8, *a* показана схема измерительного преобразователя давления,

оснащенного преобразовательным элементом индуктивного типа. Мембрана 1, воспринимающая давления, является подвижным якорем электромагнита 2 с обмоткой 3. Под действием измеряемого давления мембрана 1 перемещается, что вызывает изменение электрического сопротивления индуктивного преобразовательного

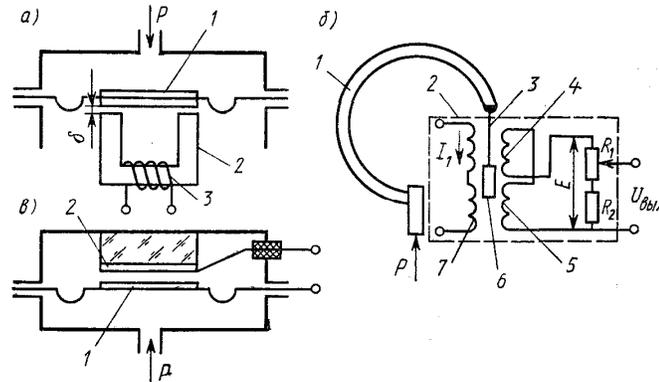


Рис. 4.8. Схемы измерительных преобразователей давления

элемента. Если пренебречь активным сопротивлением катушки, магнитными потоками рассеяния и потерями в сердечнике, индуктивность L преобразовательного элемента можно определить по формуле

$$L = \frac{W^2}{l_c / (\mu_c S_c) + d / (\mu_0 S)} \quad (4.20)$$

где W — число витков катушки; l_c , S_c — длина и площадь поперечного сечения ферромагнитного сердечника; δ — длина воздушного зазора; μ_c , μ_0 — магнитная проницаемость сердечника и воздуха; S — площадь поперечного сечения воздушного участка магнитопровода.

В процессе измерения величина $l_c / (\mu_c S_c) \ll d / (\mu_0 S)$, поэтому выражение (4.20) можно представить как

$$L = W^2 \mu_0 S / d \quad (4.21)$$

Принимая во внимание, что величина деформации мембраны пропорциональна измеряемому давлению:

$$d = k_1 P \quad (4.22)$$

преобразуем уравнение (4.21) к виду

$$L = W^2 \mu_0 S / (k_1 P) \quad (4.23)$$

Уравнение (4.23) представляет собой статическую характеристику измерительного преобразователя давления индуктивного типа.

Измерение L осуществляется обычно мостами переменного тока или резонансными LC-контурами. При давлениях 0,5—1,0 МПа толщина мембраны 0,1—0,3 мм, а при давлениях 20—30 МПа — 1,3 мм. Рабочее перемещение мембраны составляет сотые доли миллиметра.

Основная погрешность индуктивных преобразователей давления $\pm(0,2—5) \%$, постоянная времени (2,2—3) 10^{-4} с.

Дифференциально-трансформаторные измерительные преобразователи давления. Измерительный преобразователь давления дифференциально-трансформаторного (ДТ) типа (рис. 4.8, б) содержит деформационный чувствительный элемент 1 и ДТ-преобразовательный элемент 2. Преобразовательный элемент представляет собой каркас из диэлектрика, на котором размещены катушка с первичной обмоткой 7, состоящей из двух секций, намотанных согласно, и двух секций 4, 5 вторичной обмотки, включенных встречно. Внутри канала катушки расположен подвижный сердечник 6 из магнитомягкого материала, связанный с пружиной 1 тягой 3.

К выходу вторичной обмотки подключен делитель, состоящий из регулируемого R_1 и постоянного R_2 резисторов. Делитель используется при настройке преобразователя на заданный диапазон.

Путем изменения сопротивления R_i можно изменять пределы измерений на $\pm 25\%$.

Формирование выходного сигнала ДТ-преобразовательного элемента осуществляется следующим образом. При протекании по первичной обмотке тока I_1 возникают магнитные потоки, пронизывающие обе секции вторичной обмотки и индуцирующие в них ЭДС e_1 и e_2 . Значения этих ЭДС связаны с взаимными индуктивностями M_1 и M_2 между первичной обмоткой и каждой из секций вторичной

$$e_1 = 2pfI_1M_1 \quad e_2 = 2pfI_1M_2 \quad (4.24)$$

где f — частота тока I_1

При встречном включении обмоток секций 4 и 5

$$E = e_1 - e_2 = 2pfI_1(M_1 - M_2) = 2pfI_1M \quad (4.25)$$

где M — взаимная индуктивность между первичной и вторичной обмотками.

Для унифицированного ДТ-преобразовательного элемента, имеющего во вторичной обмотке резисторы R_1 и R_2 , выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ определяется взаимной индуктивностью $M_{\text{вых}}$ между первичной обмоткой и выходной цепью и может быть представлен в виде

$$U_{\text{вых}} = 2pfI_1M_{\text{вых}} \quad (4.26)$$

Величина $M_{\text{вых}}$ связана с перемещением δ сердечника b зависимостью

$$M_{\text{вых}} = M_{\text{max}} \frac{d}{d_{\text{max}}} \quad (4.27)$$

где M_{max} — максимальное значение взаимной индуктивности между первичной обмоткой и выходной цепью преобразователя, соответствующее максимальному δ_{max} перемещению сердечника.

Решая совместно уравнения (4.26) и (4.27), получим статическую характеристику унифицированного ДТ-преобразователя перемещения:

$$U_{\text{вых}} = \frac{2pfI_1 M_{\text{max}}}{d_{\text{max}}} d \quad (4.28)$$

В настоящее время разработаны ДТ-преобразовательные элементы с полным ходом сердечника 1,6, 2,5 и 4 мм. Преобразователи имеют унифицированный сигнал в виде напряжения переменного тока, изменяющегося в диапазоне $-1 \div 0 \div +1$ В. Знак «минус» указывает на изменение фазы сигнала. Указанным значениям выходного сигнала соответствуют изменения взаимной индуктивности ДТ преобразовательного элемента $-10\text{-f-}0\text{-г-} 10$ мГн.

Преобразование измеряемого давления в электрический сигнал $f/\text{вых}$ рассматриваемым преобразователем давления осуществляется путем преобразования давления в деформацию (перемещение) ЧЭ, жестко связанного с сердечником b , и последующего преобразования перемещения сердечника b в электрический сигнал ДТ-преобразовательным элементом. Статическая характеристика преобразователя давления ДТ-типа может быть получена путем совместного решения уравнения (4.28) и уравнения

$$d = kP \quad (4.29)$$

где δ — деформация ЧЭ; k — коэффициент преобразования.

Преобразователи давления ДТ-типа работают в комплекте с дифференциально-трансформаторными вторичными приборами. Классы точности ДТ-преобразователей давления 1,0 и 1,5.

Для измерения перепада давления разработаны мембранные дифманометры с ДТ-преобразовательным элементом, осуществляющим преобразование перемещения мембранного блока в сигнал измерительной информации. Классы точности преобразователей перепада давления 1,0 и 1,5. Время установления выходного сигнала не более 1 с.

Емкостные измерительные преобразователи давления. Схема измерительного преобразователя давления, оснащенного емкостным преобразовательным элементом, приведена на рис. 4.8, в. Измеряемое давление воспринимается металлической мембраной 1, являющейся подвижным электродом емкостного преобразовательного элемента. Неподвижный электрод 2 изолируется от корпуса с

помощью кварцевых изоляторов. Зависимость емкости C преобразовательного элемента от перемещения b мембраны l имеет вид

$$C = \varepsilon S / (d + d_0) \quad (4.30)$$

где ε — диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей межэлектродный зазор; S — площадь электродов; d_0 — расстояние между электродами при давлении, равном нулю.

Для преобразования C в сигнал измерительной информации обычно используют мосты переменного тока либо резонансные LC -контуры. Емкостные преобразователи давления применяют для измерения давления до 120 МПа. Толщина мембраны 0,05—1 мм. Преобразователи давления данного типа используются для преобразования быстро изменяющихся давлений. Постоянная времени преобразователя 10^{-4} с. Основная погрешность $\pm(0,2—5)$ %.

Тензорезисторные измерительные преобразователи давления. Измерительные преобразователи давления, оснащенные преобразовательными элементами тензорезисторного типа (от лат. *tendere* — натягивать) получили название тензорезисторных измерительных преобразователей давления. Преобразователи давления этого вида представляют собой деформационный ЧЭ, чаще всего мембрану, на которую наклеиваются или напыляются тензорезисторы. В основе принципа работы тензорезисторов лежит явление тензоэффекта, суть которого состоит в изменении сопротивления проводников и полупроводников при их деформации. Связь между изменением сопротивления тензорезистора и его деформацией устанавливается соотношением

$$\frac{\Delta R}{R} = k_t \frac{\Delta l}{l} \quad (4.31)$$

где $\Delta R/R$ — относительное изменение сопротивления тензорезистора; k_t — постоянный коэффициент, определяемый материалом тензорезистора; $\Delta l/l$ — относительное изменение длины тензорезистора.

Получили распространение проволочные и фольговые тензорезисторы, изготавливаемые из проводников типа манганина, нихрома, константана, а также полупроводниковые тензорезисторы, изготавливаемые из кремния и германия p - и n -типов. Сопротивление тензорезисторов, изготавливаемых из проводников, составляет 30—500 Ом, а сопротивление полупроводниковых тензорезисторов от $5 \cdot 10^{-2}$ —10 кОм.

Совершенствование технологии изготовления полупроводниковых тензорезисторов создало возможность изготавливать тензорезисторы непосредственно на кристаллическом элементе, выполненном из кремния или сапфира. Упругие элементы кристаллических материалов обладают упругими свойствами, приближающимися к идеальным. Сцепление тензорезистора с мембраной за счет молекулярных сил позволяют отказаться от использования клеящих материалов и улучшить метрологические характеристики преобразователей.

На рис. 4.9, а показана сапфировая мембрана 3 с расположенными на ней однополосковыми тензорезисторами р-ти-па с положительной 1 и отрицательной 2 чувствительностями. Положительной чувствительностью обладает тензорезистор, у которого отношение $\Delta R/R > 0$, если же $\Delta R/R < 0$ — чувствительность отрицательна. Структура однополоскового тензорезистора

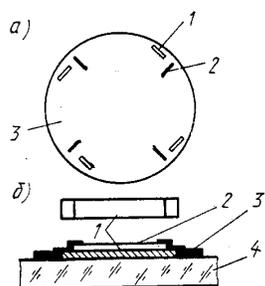


Рис. 4.9. Схемы тензорезисторных чувствительных элементов

приведена на рис. 4.9, б. Здесь 1 — тензорезистор; 2 — защитное покрытие; 3 — металлизированные токоведущие дорожки; 4 — упругий элемент преобразователя (сапфировая мембрана). Тензорезисторы можно располагать на мембране так, что при деформации они будут иметь разные по знаку приращения сопротивления. Это позволяет создавать мостовые схемы (см. гл. 6), в каждое из плеч которого включаются тензорезисторы с соответствующим значением $\Delta R/R$ и даже термокомпенсационные элементы.

На рис. 4.10, а показана схема тензорезисторного измерительного преобразователя разности давления. Мембранный тензомодуль 4 представляет собой металлическую мембрану, к которой сверху припаяна сапфировая мембрана с напыленными четырьмя кремниевыми тензорезисторами, образующими плечи неравновесного моста (см. гл. 6). Тензомодуль закреплен на основании 2 и отделен от измеряемой среды двумя разделительными металлическими мембранами 1 и 3. Замкнутые полости между тензомодулем и мембранами заполнены полиметилсилоксановой жидкостью. Измеряемая разность давлений $P_1 - P_2$ воздействует на тензомодуль через указанные мембраны и жидкость. Через герметичные выводы 5 тензомодуль подключается к встроенному электронному устройству 6. С помощью этого устройства изменение сопротивления тензорезисторов преобразуется в унифицированный токовый выходной сигнал (0—5, 0—20 или 4—20 мА), который передается по искробезопасной двухпроводной линии дистанционной передачи к блоку питания 7. Последний устанавливается во взрывобезопасном помещении и обеспечивает питание первичного преобразователя по двухпроводной линии. По этой же линии одновременно передается выходной токовый сигнал. Наряду с указанной функцией блок питания повышает мощность выходного сигнала до уровня, необходимого для подключения внешней нагрузки $R_{Hн}$, и формирует заданный уровень выходного сигнала (0—5, 0—20 или 4—20 мА). В тензорезисторных преобразователях избыточного давления, абсолютного давления и разрежения используются измерительные блоки, аналогичные рассмотренным. Отличие состоит в том, что измерительный преобразователь подключается к объекту «плюсовой» камерой, а «минусовой» сообщается

с атмосферой. У измерительных преобразователей абсолютного давления «минусовая» камера вакуумирована.

Тензорезисторный измерительный преобразователь давления с тензомодулем рычажно-мембранного типа показан на рис. 4.10, б. Тензомодуль рычажно-мембранного типа 3 размещен в заполненной полиметилсилоксановой жидкостью замкнутой полости 1 и от-

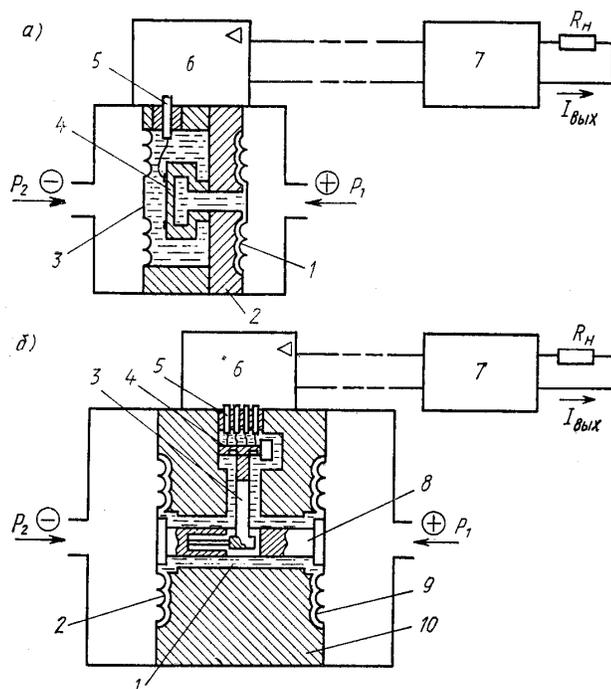


Рис. 4.10. Схемы тензорезисторных измерительных преобразователей разности давлений с унифицированным токовым выходным сигналом

делен от измеряемой среды металлическими гофрированными мембранами 2 и 9. Мембраны по наружному контуру приварены к основанию 10 и соединены между собой центральным штоком 5, который связан с концом рычага тензомодуля. Разность давлений вызывает прогиб мембран 2 и 9 тензомодуля 3, что сопровождается изменением сопротивления тензорезисторов 4. Электрический сигнал с тензомодуля через герметичные выводы 5 подается во встроенное электронное устройство 6, которое связано с блоком питания 7. Назначение блока питания аналогично рассмотренному.

Классы точности тензорезисторных измерительных преобразователей избыточного давления, разрежения и разности давлений 0,6; 1,0; 1,5. Время установления выходного сигнала при скачкообразном изменении измеряемого параметра 0,5 и 2,5 с. Диапазоны измерений: избыточного давления — от 0— 10^{-3} до 0—60 МПа; разрежения— от —1 — 0 до —10 — 0 кПа; абсолютного давления — от 0—2,5 кПа до 0—2,5 МПа; разности давлений — от 0—1 кПа до 0—2,5 МПа.

Кроме рассмотренных разработана модификация тензорезисторного преобразователя, предназначенного для измерения избыточного давления. Преобразователь имеет унифицированные токовые сигналы 0—5, 0—20, 4—20 мА. Классы точности преобразователя 0,25; 0,5; 1,0. Диапазоны измерений избыточного давления от 0— 2,5 кПа до 0—100 МПа.

Пьезоэлектрические измерительные преобразователи давления. В основу работы этих преобразователей положено преобразование измеряемого давления в усилие посредством деформационного чувствительного элемента и последующего преобразования этого усилия в сигнал измерительной информации пьезоэлектрическим преобразовательным элементом. Принцип действия пьезоэлектрического преобразовательного элемента основан на пьезоэлектрическом эффекте, наблюдаемом у ряда кристаллов, таких, как кварц, турмалин, титанат бария и др. Суть пьезоэлектрического эффекта состоит в том, что если кварцевые пластины X-среза подвергнуть сжатию силой N , то на ее поверхности возникнут заряды разных знаков. Значение заряда Q связано с силой N соотношением

$$Q = kN \quad (4.33)$$

где k — пьезоэлектрическая постоянная.

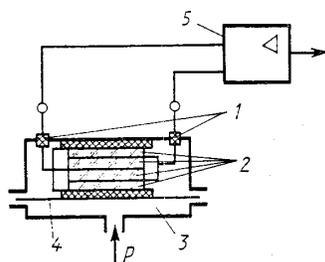


Рис. 4.11. Схема пьезоэлектрического измерительного преобразователя давления

Значение k не зависит от размера пластины и определяется природой кристалла. Для кварца $k = 2,1 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н.

На рис. 4.11 показана схема пьезоэлектрического измерительного преобразователя давления. Измеряемое давление преобразуется мембраной 4 в усилие, вызывающее сжатие столбиков кварцевых пластин 2 диаметром 5 мм и толщиной 1 мм. Возникающий электрический заряд Q через выводы 1 подается на электронный усилитель 5, обладающий большим входным сопротивлением— 10^{13} Ом. Значение заряда связано с измеряемым давлением P зависимостью

$$Q = kFP \quad (4.34)$$

где F — эффективная площадь мембраны.

Для уменьшения инерционности преобразователя объем камеры 3 минимизируют.

Так как частота собственных колебаний системы «мембрана — кварцевые пластины» составляет десятки кГц, то измерительные преобразователи этого типа обладают высокими динамическими характеристиками, что обусловило их широкое применение при контроле давления в системах с быстропротекающими процессами.

Чувствительность пьезоэлектрических измерительных преобразователей давления может быть повышена путем применения нескольких, параллельно включенных кварцевых пластин и увеличения эффективной площади мембраны.

Верхние пределы измерений пьезоэлектрических преобразователей давления с кварцевыми чувствительными элементами 2,5— 100 МПа. Классы точности 1,5; 2,0. Из-за утечки заряда с кварцевых пластин преобразователи давлений этого типа не используются для измерения статических давлений.

§ 4.6. Деформационные измерительные преобразователи давления, основанные на методе уравнивающего преобразования

Измерительные преобразователи давления этого типа получили широкое применение в автоматизированных системах управления технологическими процессами ряда отраслей промышленности. Они входят в ГСП и имеют унифицированные пневматические и электрические токовые выходные сигналы. Отличительной особенностью

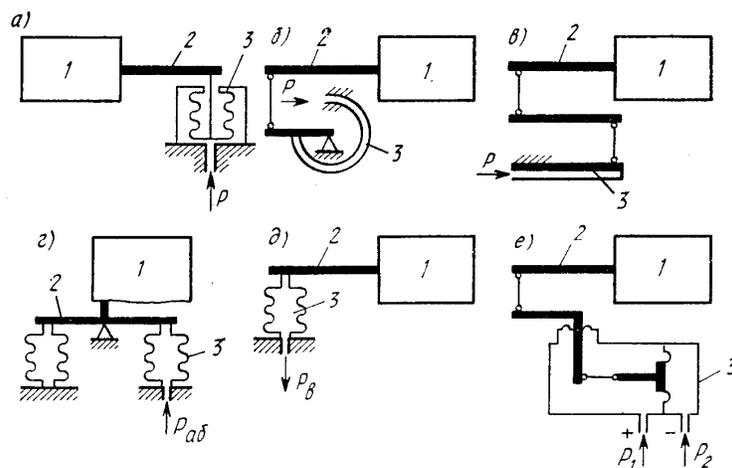


Рис. 4.12. Схемы присоединения деформационных чувствительных элементов к Унифицированному преобразователю «сила — давление»:

1 — унифицированный преобразователь; 2 — рычаг; 3 — деформационный ЧЭ

этих измерительных преобразователей является блочный принцип построения с использованием унифицированных преобразователей «сила — давление» или «сила — ток». Это позволяет создавать на их базе не только измерительные преобразователи избыточного давления, но и разности давлений и разрежения.

Работа первичных измерительных преобразователей, основанных на методе уравнивающего преобразования, подробно изложена в § 5.2, 5.3. При рассмотрении работы указанных первичных измерительных преобразователей необходимо принять во внимание, что измеряемым параметром P в данном случае является давление P , а чувствительным элементом — один из рассмотренных деформационных чувствительных элементов.

На рис. 4.12 показаны схемы присоединения деформационных ЧЭ к унифицированному преобразователю «сила — давление».

По схемам 4.12, а — в конструируются измерительные преобразователи избыточного давления, оснащенные соответственно сильфоном, одновитковой трубчатой пружиной или прямолинейной трубчатой пружиной. Измерительные преобразователи абсолютного давления конструируются по схеме 4.12, г, разрежения — по схеме 4.12, д, разности давлений — 4.12, е. Подсоединение деформационных ЧЭ к унифицированным преобразователям «сила — ток» осуществляется по аналогичным схемам.

Классы точности пневматических измерительных преобразователей давления: 0,5; (0,6); 1,0; 1,5; разности давлений: 0,6; 1,0; 1,5; 2,5; разрежения: 1,0; 1,5. Классы точности измерительных преобразователей давления, разности давлений, разрежения с унифицированным токовым сигналом: 0,5 (0,6); 1,0; 1,5.

ГЛАВА 5

СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

§ 5.1. Общие сведения

Системы передачи измерительной информации предназначены для сбора информации с удаленных от наблюдателя объектов. В телемеханике подобные измерительные системы называют телеизмерительными (от греч. *tele* — далеко).

Для контроля и управления технологическими процессами широко используются телеизмерительные системы ближнего действия, называемые системами дистанционной передачи. С помощью этих систем измерительная информация может передаваться на расстояние от нескольких десятков метров до 10—20 км.

Информация по каналам связи в измерительных системах передается в форме сигналов (см. табл. 1.1).

Формирование сигналов осуществляется путем нанесения информации на материальные носители, которыми служат периодические процессы или физические величины, например электрический ток, давление газа, электромагнитные колебания, звуковые волны. Нанесение информации на носители осуществляется путем изменения одного или нескольких параметров носителя в соответствии с передаваемой информацией. Процесс нанесения информации на носитель называют модуляцией.

В настоящее время известно более десяти видов модуляций, из которых в системах передачи информации, применяемых на предприятиях, использующих химико-технологические процессы, получили распространение прямая модуляция физических величин (рис. 5.1, а) и частотная модуляция гармонических колебаний (рис. 5.1, б).

По виду энергии носителя информации системы передачи информации подразделяют на электрические, пневматические и гидравлические. Информация в указанных системах передается в виде «естественных» или унифицированных сигналов. Основные виды и параметры унифицированных сигналов приведены в табл. 2.3. В ГСП приняты следующие системы передачи: пневматическая, электрическая токовая и электрическая частотная. Кроме перечисленных систем передачи информации в практике измерений применяются: реостатная, индуктивная, дифференциально-трансформаторная, ферродинамическая, сельсинная и др.

Указанные системы передачи информации получили название в соответствии с типом элемента, осуществляющего преобразование

«естественного» сигнала (перемещения) в электрический сигнал.

В § 2.9 было акцентировано внимание на эффективности блочно-модульного принципа построения средств измерений. Указанный принцип широко применяется при создании первичных измерительных преобразователей (ПИП) систем передачи информации ГСП.

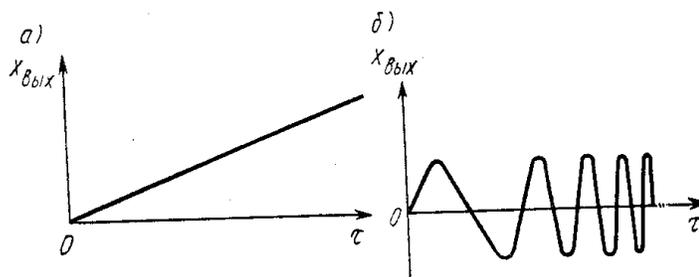


Рис. 5.1. Виды модуляций

Возможность построения ПИП блочно-модульного типа объясняется тем, что большое число технологических параметров, таких, как давление, перепад давления (расход), плотность, вязкость, температура, уровень, скорость вращения и другие, легко и с достаточной для практики точностью преобразуются в усилие или линейное (угловое) перемещение. В ПИП блочно-модульного- типа преобразование технологического параметра в унифицированный сигнал осуществляется по схемам: а) технологический параметр→усилие→унифицированный сигнал; б) технологический параметр→перемещение→ унифицированный сигнал. Для преобразования технологического параметра в усилие или линейное (угловое) перемещение разработаны методы и средства измерений, подробно рассмотренные в соответствующих главах. Преобразование усилия в унифицированный пневматический или электрический сигналы осуществляется преобразователями, работа которых основана на принципе компенсации сил. Широкое распространение получили преобразователи, с помощью которых сила преобразуется в пневматический сигнал — преобразователи «сила — давление», а также преобразователи «сила — ток», посредством которых сила преобразуется в унифицированный сигнал постоянного тока (токовый сигнал). Указанные преобразователи иногда соответственно называют «пневмосиловые» и «электросиловые».

Преобразование перемещения в унифицированный электрический сигнал постоянного тока осуществляется преобразователями «перемещение — ток», называемыми магнитомодуляционными (преобразователи с компенсацией магнитных потоков).

Преобразователи «сила — давление», «сила — ток» и «перемещение — ток» представляют собой модули, использование которых обеспечивает взаимозаменяемость ПИП в целом и отдельных его узлов. Конструктивно ПИП в ГСП оформляется в виде блока,

включающего чувствительный элемент, к которому непосредственно подводится измеряемый технологический параметр $П$, и один из названных преобразователей.

§ 5.2. Пневматическая система передачи измерительной информации

Системы передачи измерительной информации с унифицированным пневматическим сигналом находят применение в тех отраслях промышленности, где по условиям техники безопасности нецелесообразно использование электрических систем передачи. Пневматическая система передачи обеспечивает надежную передачу информации на расстояние до 300 м, а при использовании специального усилителя мощности — до 600 м. При больших расстояниях между объектом и пунктом приема информации точность системы передачи информации уменьшается.

Передача информации в пневматических системах осуществляется по каналу связи, представляющему собой пластмассовую или металлическую трубку внутренним диаметром 4—10 мм.

На рис. 5.2 представлена схема пневматической системы передачи. Система включает ПИП / (источник информации) и приемник информации IV , соединенные между собой каналом связи. ПИП / устанавливается непосредственно на объекте и осуществляет преобразование измеряемого параметра $П$ в унифицированный пневматический сигнал $R_{вых}$.

Основными узлами ПИП являются чувствительный элемент // и преобразователь «сила — давление» III . В качестве чувствительного элемента может быть использован любой чувствительный элемент, осуществляющий преобразование технологического параметра $Я$ в усилие. Например, при измерении давления чувствительным элементом может служить трубчатая пружина, сильфон или мембрана (см. § 4.6), а при измерении уровня жидкости — буёк и т. п.

Преобразователь «сила — давление» (см. рис. 5.2) состоит из корректора нуля — пружины 1, рычага 2, сильфона обратной связи 3, управляемого пневмосопротивления типа «сопло — заслонка» 4 и пневматического усилителя мощности 7. Управляемое пневмосопротивление 4 является индикатором перемещения рычага 2. Питание сопла производится через усилитель мощности 7 из линии выходного сигнала через постоянное пневмосопротивление 11. Поэтому давление в камере B всегда меньше, чем в камерах A и B , на одно и то же значение, определяемое натяжением пружин 9. Преобразование технологического параметра $П$ в пневматический сигнал осуществляется следующим образом. При отклонении преобразуемого параметра $П$ от исходного значения изменяется сила R_x , что приводит к перемещению рычага 2 относительно точки опоры O . Одновременно с рычагом перемещается и укрепленная на нем заслонка 5 относительно сопла 6. Это приводит

к изменению зазора h между соплом и заслонкой. В результате зазор становится равным h_1 и рычаг 2 занимает положение A (рис. 5.3, a). Этому положению заслонки соответствует давление на выходе сопла, которое после усиления в усилителе мощности подается в сиффон отрицательной обратной связи 3 и в канал

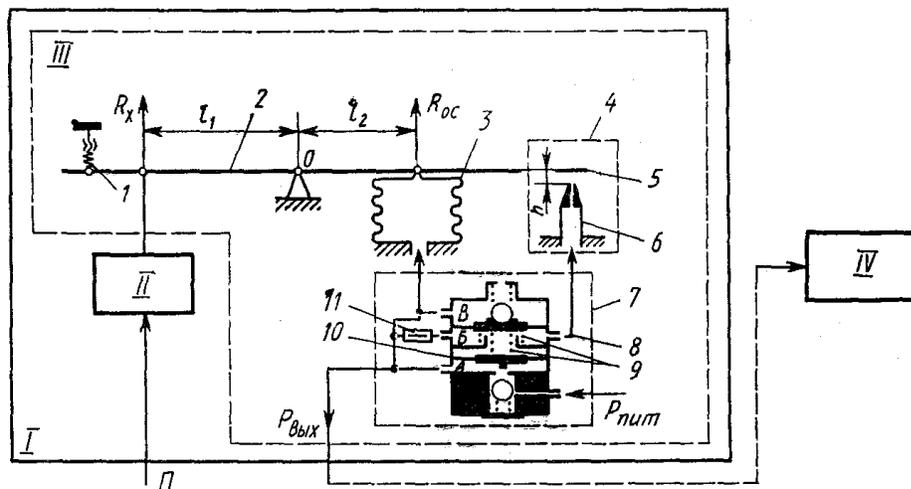


Рис. 5.2. Схема пневматической системы передачи измерительной информации

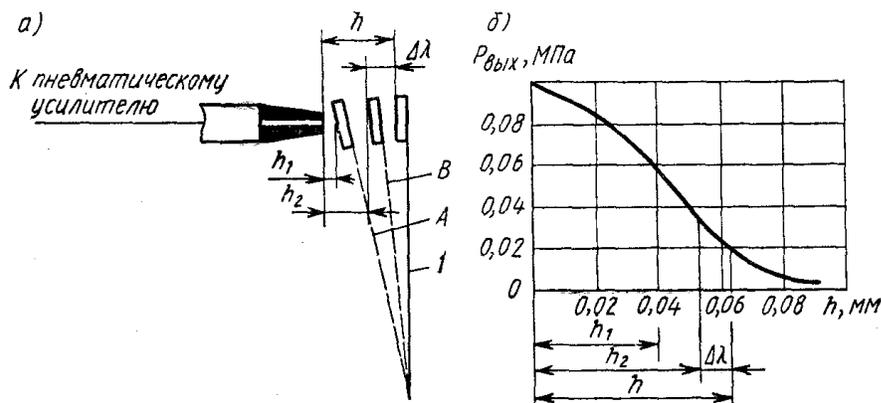


Рис. 5.3. Схема управляемого пневмосопротивления (a) и его статическая характеристика (b)

связи. Под действием возросшего давления $P_{ВЫХ}$ сиффон 3 начинает деформироваться и отодвигать заслонку от сопла. Изменение $P_{ВЫХ}$ происходит до тех пор, пока не наступит равновесие системы. Рычаг 1 при этом займет положение B , при котором расстояние между соплом и заслонкой станет равным h_2 . Расстояние h_2 меньше расстояния h на $\Delta\lambda$. Таким образом, в новом состоянии равновесия

положение рычага уже не соответствует начальному, т. е. при работе преобразователя по схеме компенсации усилий возникают перемещения, без которых преобразователь не может работать. Однако эти перемещения очень малы и определяются ходом заслонки относительно сопла (0,01—0,02 мм). Поэтому рычаг с заслонкой при любых усилиях остается практически в неизменном положении.

В процессе работы усилителя мощности 7 за счет перемещения мембран 8 и 10 перепад давлений на пневмосопротивлении I остается всегда постоянным (4000—6500 Па), что увеличивает крутизну статической характеристики преобразователя типа «сопло — заслонка» (рис. 5.3, б).

Уравнение статической характеристики преобразователя «сила—давление» может быть получено из выражения, описывающего состояние равновесия рычага 2:

$$R_x l_1 = R_{oc} l_2 \quad (5.1)$$

где R_x — усилие, развиваемое чувствительным элементом; R_{oc} — усилие, развиваемое сильфоном обратной связи. Представляя величину R_{oc} в виде

$$R_{oc} = F_{эф} P_{вых} \quad (5.2)$$

и решая совместно (5.1) и (5.2), получим

$$P_{вых} = R_x l_1 / (l_2 F_{эф}) \quad (5.3)$$

где $F_{эф}$ — эффективная площадь сильфона обратной связи.

Так как диапазон изменения унифицированного пневматического сигнала 0,02—0,1 МПа, то при $R_x=0$ путем натяжения пружины I корректора нуля осуществляют настройку нулевого сигнала преобразователя. В результате настройки зависимость (5.3) может быть переписана в виде

$$P_{вых} = \frac{R_x l_1}{l_2 F_{эф}} + 0.02 \quad (5.4)$$

Это уравнение представляет собой статическую характеристику преобразователя «сила — давление». Оно может быть преобразовано в уравнение статической характеристики ПИП, если принять во внимание статическую характеристику чувствительного элемента

$$R_x = k_0 \Pi \quad (5.5)$$

где k_0 — коэффициент преобразования чувствительного элемента. С учетом уравнения (5.5) статическая характеристика ПИП примет вид

$$P_{вых} = k_0 \frac{l_1}{l_2 F_{эф}} \Pi + 0.02 \quad (5.6)$$

ИЛИ

$$P_{\text{вых}} = k_{II} P + 0.02 \quad (5.7)$$

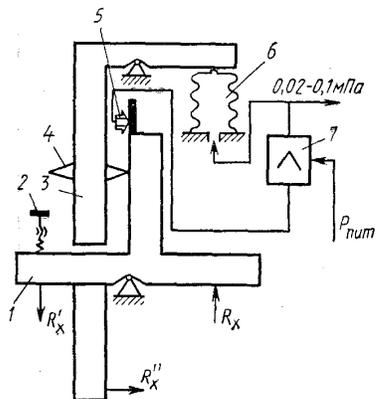
где $k_{II} = k_0 \frac{l_1}{l_2 F_{\text{эф}}}$ — коэффициент преобразования ПИП.

Путем изменения коэффициента k_n можно изменять диапазон измерений преобразователя в пределах $\pm(10—20)\%$. Практически это достигается изменением отношения l_1/l_2 в результате перемещения точки опоры О. Для преобразователя, настроенного на заданный диапазон преобразования, статическая характеристика (5.7) может быть представлена и в виде

$$P_{\text{вых}} = \frac{0.08P}{P_{\text{max}}} + 0.02 \quad (5.8)$$

Здесь $\frac{0.08}{P_{\text{max}}}$ — коэффициент преобразования ПИП, полученный из уравнения (5.7) при $P = P_{\text{max}}$ и $P_{\text{вых}} = 0,1$ МПа.

В тех случаях, когда в процессе эксплуатации ПИП возникает необходимость изменения диапазона измерений в больших пределах, целесообразно применение ПИП, оснащенного преобразователем «сила — давление», схема которого приведена на рис. 5.4.



5.4. Схема унифицированного преобразователя «сила — давление»:

1 — Г-образный рычаг; 2 — пружина корректора нуля; 3 — Г-образный рычаг; 4 — ножевая опора; 5 — управляемое пневмосопротивление; 6 — сильфон обратной связи; 7 — усилитель мощности

Принципиальное отличие преобразователя «сила — давление», представленного на рис. 5.4, от рассмотренного ранее — в наличии Г-образного рычага 3 с ножевой опорой 4, последняя может перемещаться вдоль Г-образного рычага, чем достигается изменение пределов измерений преобразователя в широком диапазоне. Отличительной особенностью преобразователя является и то, что конструкция рычага 1 позволяет подключать чувствительные элементы различных видов. Стрелками показаны направления усилий, развиваемых подключаемыми чувствительными элементами. Назначения остальных элементов преобразователя (пружины 2 корректора нуля, управляемого пневмосопротивления 5, сильфона

обратной связи 6 и усилителя мощности 7 аналогичны назначению соответствующих элементов рассмотренного преобразователя. Классы точности ПИП с унифицированным пневматическим сигналом 0,5—2,5. В качестве приемников информации в пневматических системах передачи широко применяются вторичные приборы, принцип действия

которых основан на методе уравнивающего преобразования. Эти приборы входят в ГСП и обеспечивают принципиально более высокую точность измерений, чем приборы прямого действия. Промышленность выпускает показывающие и самопишущие вторичные приборы с диапазоном измерений 0,02—0,1 МПа.

Измеряемое давление P (рис. 5.5) преобразуется чувствительным элементом прибора — сильфоном I в силу N , под действием

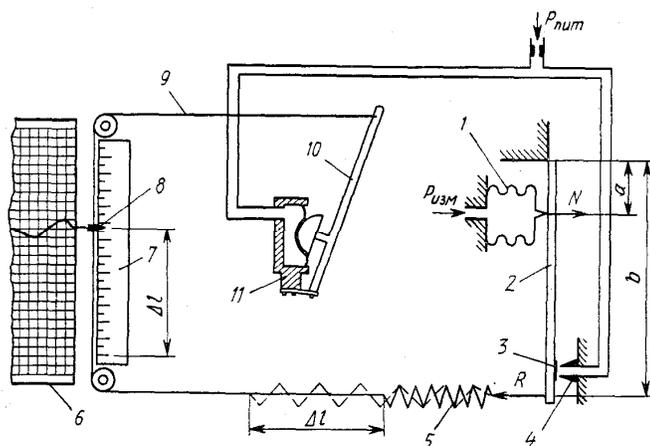


Рис. 5.5. Схема самопишущего измерительного прибора пневматической системы передачи измерительной информации

которой рычаг 2 и укрепленная на нем заслонка 3 перемещаются относительно сопла 4. В результате в линии, соединяющей сопло с силовым элементом 11, изменяется давление сжатого воздуха, что приводит к перемещению чашеобразной мембраны силового элемента и упирающегося в него рычага 10, связанного с рычагом 2 через нить 9 и пружину обратной связи 5. Последняя служит для преобразования перемещения конца рычага 2 в усилие R . Перемещение рычага 2 под действием указанных сил происходит до тех пор, пока момент M_1 , создаваемый силой N , не уравнивается моментом M_2 , создаваемым силой R . В состоянии равновесия, т. е. при

$$M_1 = M_2 \quad (5.9)$$

перемещение рычага прекращается. О значении измеряемого давления судят по положению указателя 8 на шкале 7 либо по записи на диаграммной ленте 6 пера, укрепленного на указателе. Покажем, что в состоянии равновесия перемещение указателя по шкале

пропорционально измеряемому давлению. С этой целью равенство (5.9) представим в виде

$$Rb = Na \quad (5.10)$$

где b и a — расстояния от точек приложения сил R и N до оси вращения рычага.

Принимая во внимание зависимости

$$N = F_{\text{эф}} P \quad (5.11)$$

и

$$R = c\Delta l \quad (5.12)$$

преобразуем равенство (5.10):

$$\Delta l = \frac{aF_{\text{эф}}}{bc} P \quad (5.13)$$

где Δl — деформация пружины, равная отклонению указателя; $F_{\text{эф}}$ — эффективная площадь сильфона; c — жесткость пружины. В выражении (5.13) все величины, за исключением P , — постоянные. Поэтому уравнение (5.13) может быть представлено следующим образом:

$$\Delta l = kP \quad (5.14)$$

где $k = \frac{aF_{\text{эф}}}{bc}$.

В настоящее время промышленностью освоено несколько модификаций вторичных приборов, построенных по рассмотренной схеме. Шкала приборов процентная. Класс точности 1,0.

§ 5.3. Электрические системы передачи измерительной информации с унифицированным токовым сигналом

Одной из распространенных систем передачи измерительной информации является электрическая система с унифицированным токовым сигналом. Использование постоянного тока в этой системе повышает ее помехоустойчивость, так как позволяет исключить влияние индуктивности и емкости линий связи на сигнал измерительной информации и увеличивает протяженность канала связи до 5—20 км.

Приемниками информации в электрических системах передачи могут быть промежуточные преобразователи, регуляторы, измерительные приборы или средства вычислительной техники.

В качестве источников информации в электрических системах передачи с унифицированным токовым сигналом применяются первичные измерительные преобразователи, оснащенные преобразователями либо «сила — ток», либо «перемещение — ток».

Первичные измерительные преобразователи, оснащенные преобразователями «сила — ток». В основу работы ПИП, оснащенных преобразователями «сила — ток», положен принцип силовой компенсации. ПИП включает (рис. 5.6) чувствительный элемент // и преобразователь «сила — ток» ///.

Измеряемая величина Π преобразуется чувствительным элементом // в усилие R_x . Это усилие через рычаг 2 уравнивается усилием обратной связи R_{oc} , развиваемым магнитоэлектрическим

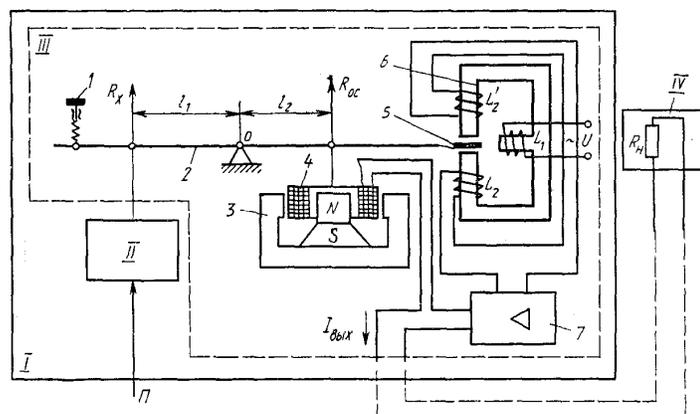


Рис. 5.6. Схема электрической системы передачи измерительной информации с преобразователем «сила — ток»

преобразовательным элементом. Магнитоэлектрический преобразовательный элемент состоит из стержневого постоянного магнита NS с П-образным магнитопроводом 3, в зазоре между постоянным магнитом NS и магнитопроводом расположена круглая рамка 4, жестко закрепленная на рычаге 2. Обмотка рамки соединена с выходом электронного усилителя 7. Вход электронного усилителя соединен со вторичными обмотками L_2 и L_2' индикатора перемещения 6 рычага 2. Индикатор перемещения выполнен в виде дифференциально-трансформаторного преобразователя, на первичную обмотку L_1 которого подается питание с электронного усилителя.

При изменении значения Π равновесие рычажной системы нарушается, что приводит к перемещению рычага и укрепленного на нем сердечника 5 из магнитомягкого материала. Перемещение сердечника преобразуется индикатором перемещения 6 в электрический сигнал Δe , который поступает на вход электронного усилителя 7. Последний усиливает и преобразует Δe в ток $I_{\text{вых}}$, подаваемый в линию связи и на вход элемента обратной связи — магнитоэлектрического преобразовательного элемента. При протекании тока

$l_{\text{вых}}$ по катушке 4 магнитоэлектрического, преобразовательного элемента формируется сила

$$R_{oc} = BnlI_{\text{вых}} \quad (5.15)$$

где B — магнитная индукция; l — средняя длина витка катушки; n — число витков катушки.

Перемещение рычага 2 под действием сил R_x и R_{oc} происходит до тех пор, пока не наступит состояние равновесия:

$$R_x l_1 = R_{oc} l_2 \quad (5.16)$$

В состоянии равновесия выходной сигнал преобразователя «сила — ток» связан с силой R_x зависимостью

$$I_{\text{вых}} = \frac{l_1}{l_2 Bnl} \quad (5.17)$$

Уравнение (5.17) представляет собой статическую характеристику преобразователя «сила — ток». Принимая во внимание статическую характеристику (5.5) чувствительного элемента, запишем уравнение (5.17) следующим образом:

$$I_{\text{вых}} = \frac{l_1 k_0}{l_2 Bnl} \Pi = k_{\Pi} \Pi \quad (5.18)$$

где k_0 — коэффициент преобразования чувствительного элемента;

$k_{\Pi} = \frac{l_1 k_0}{l_2 Bnl}$ — коэффициент преобразования ПИП.

Уравнение представляет собой статическую характеристику ПИП.

Путем изменения коэффициента k_{Π} можно изменять диапазон измерений преобразователя в пределах $\pm (10—20)$ %. Как и в пневматических преобразователях, изменение k_{Π} достигается изменением отношения l_1/l_2 .

Для преобразователя, настроенного на заданный диапазон измерений, например $0—\Pi_{\text{max}}$, статическая характеристика имеет вид

$$I_{\text{вых}} = k \frac{\Pi}{\Pi_{\text{max}}} \quad (5.19)$$

где k — постоянный коэффициент, определяемый диапазоном изменения выходного сигнала и равный 5 для ПИП с диапазоном изменения выходного сигнала $0—5$ мА.

Для ПИП с диапазоном измерений $\Pi_{\text{min}} — \Pi_{\text{max}}$, статические характеристики имеют вид

$$I_{\text{вых}} = 5 \frac{\Pi - \Pi_{\text{min}}}{\Pi_{\text{max}} - \Pi_{\text{min}}} \quad (5.20)$$

если диапазон изменения выходного сигнала 0—5 мА, или

$$I_{\text{вых}} = 20 \frac{P - P_{\text{min}}}{P_{\text{max}} - P_{\text{min}}} \quad (5.21)$$

если диапазон изменения выходного сигнала 0—20 мА.

В тех случаях, когда возникает необходимость изменения диапазона измерений в больших пределах, применяют ПИП с преобразователем «сила — ток», представленным на рис. 5.7.

Перемещением ножевой опоры 4 можно изменять диапазон измерений в широких пределах. Назначение остальных элементов преобразователя «сила — ток» аналогично назначению соответствующим элементам преобразователя, представленного на рис. 5.6.

Кроме рассмотренных ПИП с линейной статической характеристикой разработаны преобразователи с квадратичной корневой статической характеристикой. Отличительной чертой преобразователей этого типа является использование электромагнитного преобразовательного элемента в качестве элемента обратной связи. Развиваемое им усилие обратной связи R_{oc} связано с током /вых соотношением

$$R_{oc} = k_{oc} I_{\text{вых}}^2 \quad (5.22)$$

где k_{oc} — коэффициент преобразования электромагнитного преобразовательного элемента.

Преобразователи с квадратичной корневой статической характеристикой находят применение в тех случаях, когда необходима передача измерительной информации о расходе, измеряемом методом переменного перепада давления.

При эксплуатации системы передачи с унифицированным токовым сигналом важным является соответствие суммарного сопротивления внешней нагрузки нормированному значению. Суммарное сопротивление внешней нагрузки не должно превышать 2,5 кОм при токе 5 мА и 1 кОм при токе 20 мА. Дальность передачи информации при токе 0—5 мА равна 5 км, а при токе 0—20 мА—20 км.

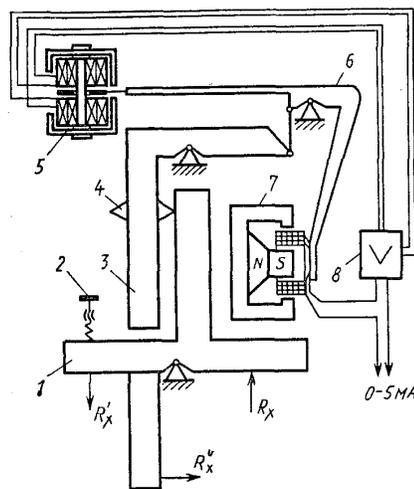


Рис. 5.7. Схема унифицированного преобразователя «сила — ток»
1 — Т-образный рычаг; 2 — пружина корректора нуля; 3 — Г-образный рычаг; 4 — ножевая опора; 5 — индикатор перемещений; 6 — рычаг обратной связи; 7 — элемент обратной связи; 8 — электронный усилитель

Первичные измерительные преобразователи, оснащенные преобразователями «перемещение — ток». Система передачи измерительной информации на базе ПИП с преобразователем «перемещение — ток» представлена на рис. 5.8 [6].

Основными узлами ПИП являются чувствительный элемент // и преобразователь «перемещение — ток» ///.

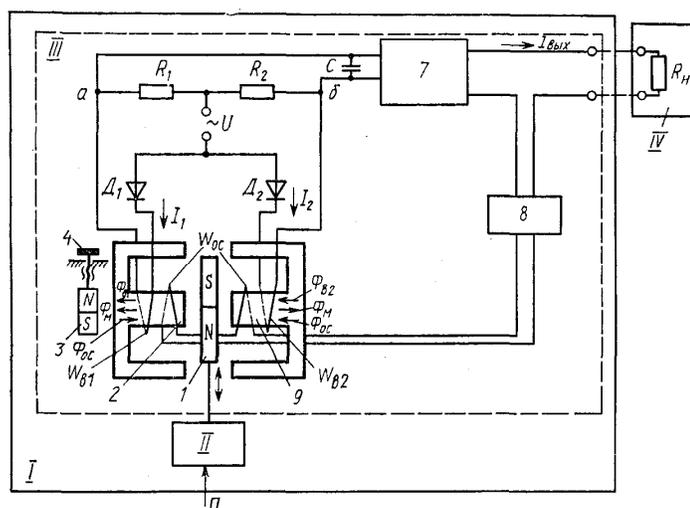


Рис. 5.8. Схема электрической системы передачи измерительной информации с преобразователем «перемещение — ток»

Чувствительный элемент // преобразует измеряемый технологический параметр Π в линейное перемещение магнитного сердечника /, изготовленного в виде постоянного магнита цилиндрической формы.

Преобразователь /// осуществляет преобразование перемещения постоянного магнита / в электрический сигнал. Для преобразования используется магнитная система из внешних магнитопроводов 5 и 6 (рис 5.9) и индикаторов магнитных потоков (магнитопроводов специальной формы) 2 и 9, каждый из которых содержит обмотку возбуждения $W_{\text{в}}$ и обмотку обратной связи $W_{\text{ос}}$. Обмотки возбуждения с последовательно включенными диодами D_1 и D_2 образуют плечи неравновесного моста. Два других плеча образуют резисторы R_1 и R_2 , шунтированные фильтрующим конденсатором C . Измерительная диагональ ab моста подключена к усилителю 7, выход которого соединяется через канал связи с приемником информации IV и через элемент обратной связи 8 с обмотками обратной связи $W_{\text{ос}}$.

Питание мостовой схемы осуществляется напряжением в виде прямоугольных импульсов частотой 50 Гц.

При нейтральном положении магнитного сердечника / (рис. 5.9, а) ответвляемые магнитные потоки Φ_2 и Φ_3 в магнитопроводы индикаторов магнитных потоков 2 и 9 равны по величине и противоположны по направлению.

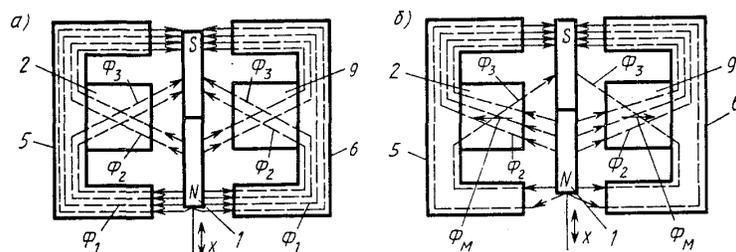


Рис. 5.9, Распределение магнитных потоков в магнитном преобразовательном элементе

Так как магнитные потоки Φ_2 и Φ_3 равны, то результирующий магнитный поток Φ_M равен нулю.

При смещении сердечника от среднего положения (рис. 5.9, б) возникает результирующий магнитный поток Φ_M , направление которого определяется направлением перемещения сердечника и его полярностью. Если сердечник / находится в нейтральном положении, то в магнитопроводах индикаторов магнитных потоков 2 и 9 (см. рис. 5.8) присутствуют только магнитные потоки Φ_{B1} и Φ_{B2} . Эти магнитные потоки обуславливают одновременное насыщение магнитопроводов индикаторов 2 и 9, что отражается на значениях индуктивности и полного сопротивления обмоток W_{B1} и W_{B2} . В результате в любой момент времени $I_1=I_2$ и мост находится в равновесии. При изменении положения сердечника в магнитопроводах индикаторов 2 и 9 появляются магнитные потоки Φ_M , которые с магнитными потоками Φ_{B1} и Φ_{B2} создают результирующие магнитные потоки:

$$\Phi_1^* = \Phi_M + \Phi_{B1} \text{ и } \Phi_2^* = \Phi_M - \Phi_{B2}.$$

Под влиянием магнитного потока Φ_1^* насыщение магнитопровода индикатора магнитного потока 2 наступает раньше, чем насыщение магнитопровода индикатора магнитного потока 9 потоком Φ_2^* . Вследствие этого ток I_1 , протекающий по обмотке W_{B1} , резко возрастает, что сопровождается нарушением равновесия мостовой схемы.

Усилитель формирует на выходе сигнал постоянного тока $I_{вых}$, пропорциональный разбалансу мостовой схемы. Сигнал поступает в канал связи и через устройство обратной связи δ — в обмотку обратной связи W_{oc} .

При прохождении тока I_{oc} по обмоткам W_{oc} формируются магнитные потоки Φ_{oc} которые направлены навстречу магнитным потокам Φ_M и обеспечивают их компенсацию.

В результате компенсирующего воздействия магнитного потока Φ_{oc} на магнитный поток Φ_M равновесие мостовой схемы восстанавливается и для любого момента времени $I_1 \gg I_2$.

Статическая характеристика преобразователя определяется видом зависимости $I_{oc}=f(I_{ввх})$. Для преобразователей с линейной характеристикой устройство обратной связи представляет собой активное сопротивление, а для преобразователей с квадратичной корневой характеристикой устройство обратной связи выполнено в виде квадраторов. Настройка ПИП на заданный диапазон измерений осуществляется изменением параметров устройства обратной связи, а настройка нулевого сигнала — с помощью винта 4, перемещающего шунт 3. Суммарное сопротивление внешней нагрузки $R_{вн}$ не должно превышать 2,5 кОм. Классы точности преобразователей с унифицированным токовым сигналом: 0,6; 1,0; 1,5.

§ 5.4. Электрическая система передачи измерительной информации с унифицированным частотным сигналом

Системы передачи измерительной информации с унифицированным частотным сигналом реализуются на базе ПИП, осуществляющих преобразование измеряемого технологического параметра в унифицированный частотный сигнал.

Преобразование происходит по схеме параметр \rightarrow сила \rightarrow частота.

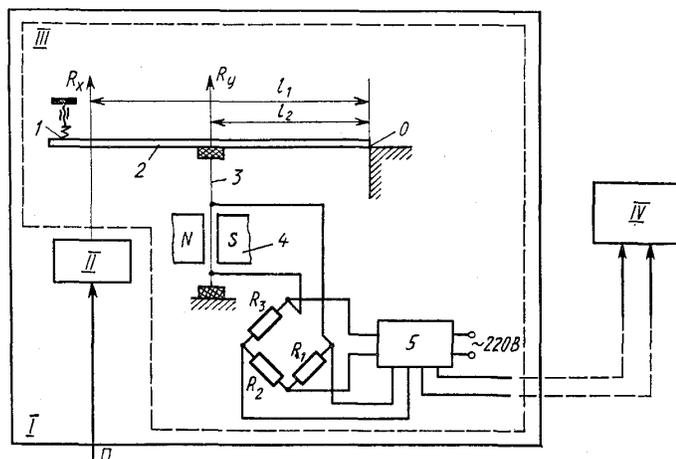


Рис. 5.10. Схема электрической системы передачи измерительной информации с преобразователем «сила — частота»

На рис. 5.10 приведена электрическая система передачи измерительной информации с унифицированным частотным сигналом. ПИП *I* включает чувствительный элемент *II*, посредством которого измеряемый параметр *Π* преобразуется в усилие R_x , и преобразователь «сила — частота» *III*, осуществляющий преобразование усилия R_x в унифицированный частотный сигнал.

Преобразователь «сила — частота» реализуется на базе струнного генератора, представляющего собой мостовую схему, образованную резисторами R_1 , R_2 и R_3 и струной 3 сопротивлением R_c . Измерительная диагональ моста включена на вход электронного усилителя, выход которого подключен к диагонали питания моста. Струна расположена между полюсами постоянного магнита 4. Нижний конец струны жестко закреплен на неподвижном основании, а верхний — на подвижном рычаге 2.

При протекании по струне переменного тока струна начинает колебаться и в ней индуцируется ЭДС, приближающаяся по форме к синусоидальной. В соответствии с физическими процессами, протекающими в струне, при ее колебаниях в магнитном поле предложена [5] схема замещения, имеющая вид колебательного контура (рис. 5.11).

Параметры колебательного контура связаны с параметрами струны следующими соотношениями:

$$L = \frac{B^2 l^3 S}{2p^2 F} \quad C = \frac{2r}{B^2 l} \quad R = \frac{B^2 l}{4ru} \quad (5.23)$$

где L — эквивалентная индуктивность; B — индукция в зазоре постоянного магнита; l — длина струны; S — площадь поперечного сечения струны; F — усилие; C — эквивалентная емкость; ρ — плотность материала струны; ν — коэффициент трения о воздух; R — динамическое сопротивление колеблющейся струны.

Сопротивление r в схеме замещения представляет собой активное сопротивление струны, когда она неподвижна. При колебаниях струны мостовая схема, содержащая чисто активные сопротивления, превращается в мост с частотно-зависимыми элементами. Известно, что частота генератора с самовозбуждением определяется собственной частотой f колебательного контура, которая связана с индуктивностью L и емкостью C контура зависимостью

$$f = \frac{1}{2p\sqrt{LC}}$$

Для рассматриваемого генератора собственная частота колебаний / определяется выражением

$$f = 0.5 \sqrt{\frac{F}{l^2 S r}} \quad (5.24)$$

Как следует из уравнения (5.24), собственная частота колебаний генератора определяется собственной частотой колебаний струны и зависит от усилия натяжения. Рассмотренный генератор работает в диапазоне частот 10^2 - 10^4 Гц.. Ток, пропускаемый через струну, не превышает 100 мкА. Длина струны составляет 20—50 мм а диаметр — сотые доли миллиметра. Преобразование измеряемого параметра $П$ в частотный сигнал осуществляется следующим образом. Чувствительный элемент преобразует параметр $П$ в пропорциональное усилие R_x , воспринимаемое рычагом 2, а вместе с ним и струной 3. Изменение натяжения струны приводит к изменению собственной частоты колебаний генератора, что отражается на его выходном сигнале в виде частоты переменного тока. Настройка преобразователя на заданный диапазон измерений осуществляется перемещением точки опоры О рычага 2. Начальное значение выходного сигнала устанавливается корректором нулевого сигнала 1.

Как видно из уравнения (5.24), статическая характеристика преобразователя нелинейна. С целью линеаризации статической характеристики в некоторых модификациях преобразователя применяют квадраторы. Выходной сигнал ПИП с линейной статической характеристикой можно рассчитать по формуле

$$f = f_0 + \frac{П - П_{\min}}{П_{\max} - П_{\min}} \Delta f \quad (5.25)$$

где f_0 — начальная частота; $П_{\max}$, $П_{\min}$ — соответственно верхнее и нижнее значения диапазона измерений; Δf — диапазон изменения частоты.

Приемниками измерительной информации, поступающей от ПИП с унифицированным частотным сигналом, могут быть цифровые приборы, управляющие и вычислительные машины. Классы точности ПИП с частотным унифицированным сигналом 0,5 и 1,0. Дальность передачи информации до 10 км.

§ 5.5. Дифференциально-трансформаторная система передачи измерительной информации

Дифференциально-трансформаторная система передачи (рис 5 12) состоит из ПИП 1 и приемника информации 4V, в качестве которого используется вторичный прибор дифференциально-трансформаторного типа. ПИП содержит чувствительный элемент 2, осуществляющий преобразование измеряемого параметра Я в перемещение жестко связанного с ним сердечника 1, и унифицированный ДТ-преобразовательный элемент 3, с помощью которого перемещение сердечника 1 преобразуется в напряжение переменного тока. Вторичный прибор дифференциально-трансформаторного типа 4V содержит компенсирующий ДТ-преобразовательный элемент с корректором нуля 2, кулачок 5, кнопку 3 для контроля исправности измерительного прибора, указатель 6, шкалу 7, реверсивный двигатель 8

и усилитель 9. Компенсирующий ДТ-преобразовательный элемент отличается от передающего тем, что содержит корректор нуля. Последний представляет собой дополнительную обмотку (ДО) с подключенным к ней регулируемым резистором R_3 . Дополнительная обмотка (ДО) состоит из двух секций, которые разме-

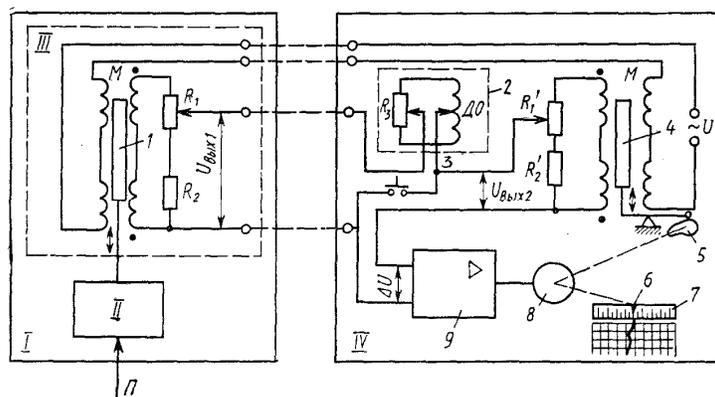


Рис. 5.12. Схема дифференциально-трансформаторной системы передачи измерительной информации

щаются в средней части ДТ-преобразовательного элемента и наматываются поверх его вторичной обмотки.

Первичные обмотки компенсирующего и передающего ДТ-преобразовательных элементов включены последовательно и питаются напряжением переменного тока промышленной частоты от специальной обмотки силового трансформатора усилителя 9.

Вторичные обмотки ДТ-преобразовательных элементов включены по компенсационной схеме, в которой на вход усилителя поступает сигнал

$$\Delta U = U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}} \quad (5.26)$$

где $U_{\text{вых1}}$ $U_{\text{вых2}}$ — выходные сигналы передающего и компенсирующего ДТ-преобразовательных элементов.

При нулевом значении преобразуемого параметра Π сердечники 1 и 4 находятся в средних положениях, в которых $U_{\text{вых1}} = U_{\text{вых2}}$. При этом на вход усилителя поступает сигнал $\Delta U = 0$, обеспечивающий нахождение указателя 6 на начальной отметке шкалы 7. Отклонение параметра Π от нулевого значения вызывает деформацию чувствительного элемента II, сопровождаемую перемещением сердечника из среднего положения.

На выходе передающего ДТ-преобразовательного элемента формируется сигнал $U_{\text{вых1}}$ отличный от сигнала $U_{\text{вых2}}$, который формируется

в это же время компенсирующим ДТ-преобразовательным элементом. В результате на входе усилителя появляется сигнал ΔU , отличный от нуля. Этот сигнал усиливается до значения, достаточного для приведения в движение ротора реверсивного двигателя. Ротор поворачивает кулачок 5 и перемещает сердечник компенсирующего ДТ-преобразовательного элемента. Движение ротора происходит до тех пор, пока сердечник не займет такое положение, при котором $U_{\text{вых}2}$ станет равным $U_{\text{вых}1}$. В этот момент сигнал А [7]=0 и движение ротора прекращается. О значении измеряемого параметра судят по положению указателя 6, кинематически связанного с ротором реверсивного двигателя, на шкале 7. Для контроля исправности измерительного прибора используется кнопка 3, при нажатии которой закорачиваются выходы передающего ДТ-преобразовательного элемента, и на вход усилителя поступает сигнал только с компенсирующего ДТ-преобразовательного элемента. Если прибор исправен, то указатель должен переместиться на контрольную отметку шкалы. В настоящее время измерительные приборы ДТ-типа выпускаются с кулачками, имеющими профиль, описываемый линейной или квадратичной зависимостью

$$\Delta L = f(a) \quad (5.27)$$

где ΔL — перемещение сердечника; a — угол поворота кулачка.

Кулачками с квадратичной характеристикой оснащаются измерительные приборы, предназначенные для измерения расхода на основе принципа переменного перепада давления на сужающем устройстве. В этих же приборах используются интегрирующие устройства. Классы точности вторичных приборов дифференциально-трансформаторного типа 1,0, а ПИП, оснащенных преобразователями «перемещение — электрический сигнал» ДТ-типа,—1,0; 1,5; 2,5. Расстояние между ПИП и приемником информации примерно 250 м.

Достоинствами рассмотренной системы передачи являются простота, надежность и незначительные дополнительные погрешности, обусловленные изменениями напряжения питания первичных обмоток ДТ-преобразовательных элементов и активного сопротивления линий связи, если оно не превышает 5 Ом (соответствует длине линии связи 250 м).

§ 5.6. Сельсинная система передачи измерительной информации

Для передачи на расстояние больших угловых перемещений применяют сельсинные системы, в которых преобразование угловых перемещений в сигнал измерительной информации осуществляется сельсинами.

Сельсины представляют собой электрические микромашины переменного тока. Работа сельсинов основана на преобразовании углового перемещения в изменение индуктивной связи между обмотками возбуждения и синхронизации.

На рис. 5.13 приведена схема сельсинной системы передачи. Система состоит из ПИП I и приемника информации VI. ПИП содержит чувствительный элемент II, кинематически связанный с ротором сельсина ///, называемого сельсином-датчиком. Приемник информации VI представляет собой сельсин, называемый сельсином-приемником, ротор которого кинематически связан с отсчетным устройством IV.

Обмотки возбуждения *OB1* и *OB2* сельсинов подключаются к сети однофазного напряжения, а одноименные обмотки синхрони-

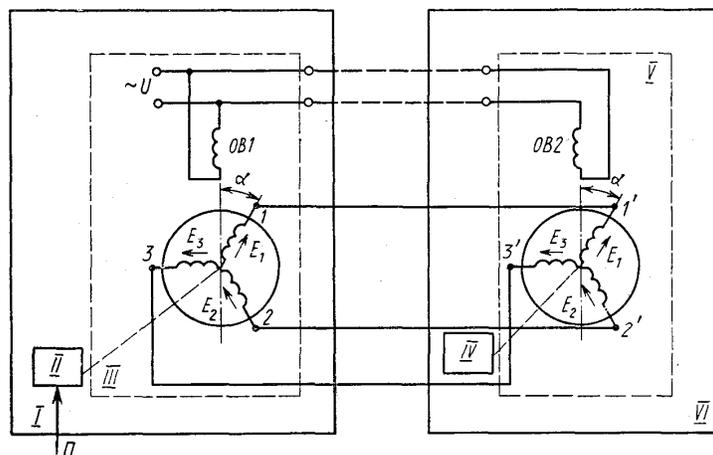


Рис. 5.13. Схема сельсинной системы передачи измерительной информации

зации *I—3* соединены между собой проводами канала связи. Такая схема соединения сельсинов называется индикаторной. При протекании тока по обмотке возбуждения возникает пульсирующий магнитный поток, который индуцирует в каждой фазе обмотки синхронизации переменные ЭДС:

$$E_1 = E_{\max} \cos a \quad (5.28)$$

$$E_2 = E_{\max} \cos(a - 120^\circ) \quad (5.29)$$

$$E_3 = E_{\max} \cos(a + 120^\circ) \quad (5.30)$$

где E_{\max} — наибольшее действующее значение ЭДС фазы обмотки, когда ее ось совпадает с осью магнитного потока возбуждения; a — угол поворота ротора.

Если оси одноименных обмоток синхронизации *I—3* сельсинов расположены одинаково относительно осей обмоток возбуждения, то в фазах обмоток синхронизации сельсинов индуцируются одинаковые ЭДС,

уравновешивающие друг друга. В результате токи в обмотках и линиях связи равны нулю. Этому состоянию равновесия соответствует согласованное положение сельсинов.

Отклонение измеряемого параметра Y от исходного значения преобразуется чувствительным элементом в угловое перемещение ротора сельсина-датчика. Новое положение сельсина-датчика определяется углом $\beta \neq \alpha$. В этом состоянии равновесие ЭДС обмоток синхронизации нарушается и между одноименными зажимами обмоток возникают ЭДС, равные разностям ЭДС соответствующих фаз сельсина-датчика и сельсина-приемника. По обмоткам синхронизации проходят токи, которые, взаимодействуя с магнитным полем обмоток возбуждения, создают в каждом сельсине синхронизирующий момент M , пропорциональный синусу угла рассогласования:

$$M = M_{\max} \sin j \quad (5.31)$$

где M_{\max} — наибольший синхронизирующий момент при $\varphi = 90^\circ$; $\varphi = \beta - \alpha$ — угол рассогласования.

Так как положение ротора сельсина-датчика фиксировано, то синхронизирующий момент поворачивает ротор сельсина-приемника до согласования с ротором сельсина-датчика. В состоянии равновесия ротор сельсина-приемника останавливается. О значении измеряемого параметра судят по отсчетному устройству IV , с которым связан ротор сельсина-приемника.

Абсолютная погрешность сельсинов-датчиков $\pm(0,25; 0,5; 1,0)$ град, сельсинов-приемников $\pm(0,75; 1,5; 2,5)$ град. Расстояние между сельсином-датчиком и сельсином-приемником до 2—3 км.

§ 5.7. Пневмоэлектрические и электропневматические преобразователи

В большинстве современных систем автоматического управления производственными процессами используются средства измерений с различными выходными и входными сигналами, например пневматическими, электрическими, гидравлическими и др. Для обмена информацией в подобных системах широко применяются преобразователи пневматических сигналов в электрические (ПЭП) и электрических сигналов в пневматические (ЭПП).

Пневмоэлектрические преобразователи — измерительные преобразователи, предназначенные для преобразования непрерывного унифицированного пневматического сигнала в непрерывный унифицированный сигнал постоянного тока. Известно большое число различных по принципу действия ПЭП. Наиболее широкое применение в измерительных системах получил ПЭП (рис. 5.14, *a*), работающий по принципу компенсации моментов сил. Преобразуемый пневматический сигнал $P_{вх}$ поступает в одновитковую трубчатую пружину I , которая под действием давления, например при его увеличении, несколько раскручивается. Ее свободный конец перемещается

вверх и растягивает пружину 2. Растяжение последней вызывает на ней возникновение силы упругой деформации R_1 , которая передается рычагу 3, так как нижний конец пружины 2 закреплен на рычаге 3. Сила R_1 создает на рычаге 3 момент M_1 который стремится повернуть рычаг 3 вокруг точки O . На конце рычага укреплен металлический флажок 4, который при повороте рычага приближается к плоской катушке 5. При этом значение индуктивного

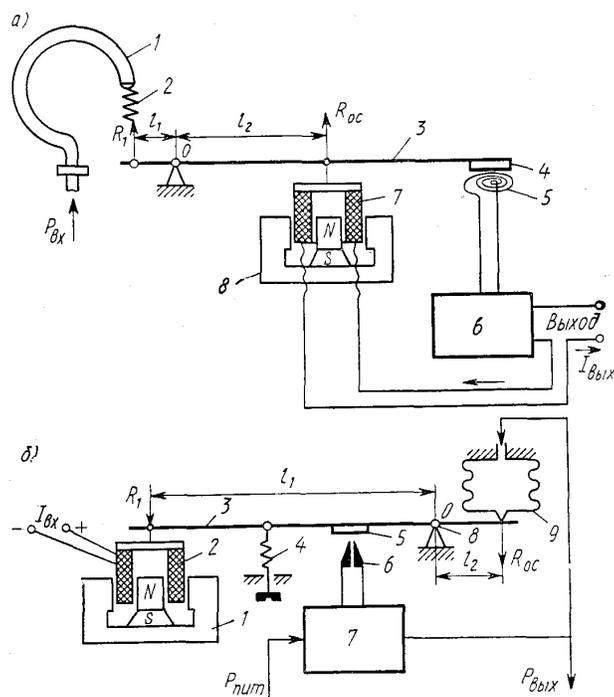


Рис. 5.14. Схемы пневмоэлектрического и электропневматического преобразователей

сопротивления этой катушки увеличивается. С помощью преобразовательного элемента 6 значение индуктивного сопротивления катушки 5 преобразуется в сигнал постоянного тока, который поступает на выход ПЭП и в катушку 7 отрицательной обратной связи. При протекании по катушке постоянного тока вокруг нее возникает постоянное по направлению электромагнитное поле, которое взаимодействует с полем постоянного магнита 8. При этом на катушку 7, соединенную с рычагом 3, действует сила R_{oc} . Эта сила создает на рычаге вращающий момент M_2 , направленный противоположно

моменту M_1 . В результате движение рычага 3 происходит до тех пор, пока моменты M_1 и M_2 не станут равны. Между силой R_1 и измеряемым давлением P , а также между силой R_{oc} и током I имеют место зависимости:

$$R_1 = k_1 P \quad (5.32)$$

$$R_{oc} = k_2 I \quad (5.33)$$

где k_1 — коэффициент преобразования одновитковой трубчатой пружины 1; k_2 — коэффициент преобразования магнитоэлектрического преобразовательного элемента, состоящего из катушки 7 и магнита 8. Используя уравнение равенства моментов сил $M_1 = M_2$ и выражения (5.32) и (5.33), находят

$$I = k P \quad (5.34)$$

где $k = l_1 k_2 / (l_2 k_1)$ — коэффициент преобразования ПЭП.

Класс точности пневмоэлектрического преобразователя 1.

Электропневматические преобразователи необходимы в тех случаях, когда в пневматическую систему управления требуется ввести информацию о технологических параметрах, поступающую от измерительных преобразователей с унифицированным токовым сигналом, а также когда автоматическая система управления электрическая, а ее командный сигнал посылается на пневматический исполнительный механизм. Широкое распространение получили электропневматические преобразователи (ЭПП), работа которых основана на принципе компенсации усилий. В ЭПП, построенном на этом принципе (рис. 5.14, б), входной унифицированный сигнал $I_{вх}$ поступает на катушку 2 магнитоэлектрического преобразовательного элемента, и образованное при этом ее электромагнитное поле взаимодействует с полем постоянного магнита /. В результате создается усилие $R_1 = BlI_{вх}$ [см. формулу (5.15)], перемещающее катушку в кольцевом зазоре магнита и поворачивающее рычаг 3 вокруг точки опоры 8. При этом заслонка 5, расположенная на рычаге 3, меняет свое положение относительно сопла 6, что изменяет давление $P_{вых}$ на выходе пневмоусилителя 7. Давление $P_{вых}$ поступает на сильфон 9 обратной связи и создает компенсирующее усилие R_{oc} . Движение рычага продолжается до тех пор, пока моменты, создаваемые на рычаге 3 силами R_1 и R_{oc} , не станут равными.

В состоянии равновесия справедливо равенство

$$P_{вых} = \frac{Bl l_1}{F_{эф} l_2} I_{вх} = k I_{вх} \quad (5.35)$$

где k — коэффициент преобразования ЭПП.

Установка начального уровня выходного сигнала преобразователя осуществляется с помощью пружины 4. Классы точности электропневматического преобразователя 1,0 и 1,5.

ГЛАВА 6 ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

§ 6.1. Общие сведения

Температурой называют физическую величину, характеризующую степень нагретости тела. Практически все технологические процессы и различные свойства вещества зависят от температуры.

В отличие от таких физических величин, как длина, масса и др. температура является не экстенсивной (параметрической), а интенсивной (активной) величиной. Так, если разделить на две равные части гомогенное тело, то его масса делится пополам. Температура, являющаяся интенсивной величиной, таким свойством аддитивности не обладает, т. е. для системы, находящейся в термическом равновесии, любая микроскопическая часть системы имеет одинаковую температуру. Поэтому не представляется возможным создание эталона температуры, подобном тому, как создаются эталоны экстенсивных величин.

Измерять температуру можно только косвенным путем, основываясь на зависимости от температуры таких физических свойств тел, которые поддаются непосредственному измерению. Эти свойства тел называют термометрическими. К ним относят длину, объем, плотность, термоЭДС, электрическое сопротивление и т. д. Вещества, характеризующиеся термометрическими свойствами, называют термометрическими. Средство измерений температуры называют термометром. Для создания термометра необходимо иметь температурную шкалу.

§ 6.2. Температурные шкалы

Температурной шкалой называют конкретную функциональную числовую связь температуры со значениями измеряемого термометрического свойства. В этой связи представляется возможным построение температурной шкалы на основе выбора любого термометрического свойства. В то же время нет ни одного термометрического свойства, которое линейно изменяется с изменением температуры и не зависит от других факторов в широком интервале измерения температур.

Первые шкалы появились в XVIII в. Для построения их выбирались две опорные, или реперные точки t_1 и t_2 , представляющие собой температуры фазового равновесия чистых веществ. Разность температур $t_2 - t_1$ называют основным температурным интервалом.

Фаренгейт (1715 г.), Реомюр (1776 г.) и Цельсий (1742 г.) при построении шкал основывались на допущении линейной связи между температурой t и термометрическим свойством, в качестве которого использовалось расширение объема жидкости V , т. е.

$$t = a + bV,$$

где a и b — постоянные коэффициенты.

Подставив в это уравнение $V=V_1$ при $t=t_1$ и $V=V_2$ при $t=t_2$, после преобразований получим уравнение температурной шкалы:

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{V_2 - V_1}(V - V_1) \quad (6.1)$$

В шкалах Фаренгейта, Реомюра и Цельсия точке плавления льда t_1 соответствовали $+32$, 0 и 0° , а точке кипения воды t_2 — 212 , 80 и 100° . Основной интервал $t_2 - t_1$ в этих шкалах делится соответственно на $N = 180$, 80 и 100 равных частей, и $1/N$ часть каждого из интервалов называют градусом Фаренгейта — $t^\circ F$, градусом Реомюра — $t^\circ R$ и градусом Цельсия — $t^\circ C$. Таким образом, для шкал, построенных по указанному принципу, градус не является единицей измерения, а представляет собой единичный промежуток — масштаб шкалы.

Для пересчета температуры из одной указанной шкалы в другую используют соотношение

$$t^\circ C = 1,25^\circ R = (5/9)(t^\circ F - 32).$$

Позднее было выяснено, что показания термометров, имеющих разные термометрические вещества (например, ртуть, спирт и др.), использующих одно и то же термометрическое свойство и равномерную градусную шкалу, совпадают лишь в реперных точках, а в других точках показания расходятся. Последнее особенно заметно при измерении температур, значения которых расположены далеко от основного интервала.

Указанное обстоятельство объясняется тем, что связь между температурой и термометрическим свойством на самом деле нелинейна и эта нелинейность различна для различных термометрических веществ. В частности, в рассматриваемом случае нелинейность между температурой и изменением объема жидкости объясняется тем, что температурный коэффициент объемного расширения жидкости сам изменяется от температуры и это изменение различно для различных капельных жидкостей.

На основе описанного принципа построения может быть получено любое количество температурных шкал, значительно различающихся между собой. Такие шкалы называют условными, а масштабы этих шкал — условными градусами. Проблема создания температурной шкалы, не зависящей от термометрических свойств веществ, была решена в 1848 г. Кельвином, а предложенная им шкала была названа термодинамической. В отличие от условных температурных

шкал термодинамическая температурная шкала является абсолютной.

Термодинамическая шкала температур основана на использовании второго закона термодинамики. В соответствии с этим законом коэффициент полезного действия η тепловой машины, работающей по обратимому циклу Карно, определяется только температурами нагревателя T_H и холодильника T_X и не зависит от свойств рабочего вещества, т. е.

$$h = \frac{T_H - T_X}{T_H} = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H} \quad (6.2)$$

где Q_H и Q_X — соответственно количество теплоты, полученное рабочим веществом от нагревателя и отданное холодильнику.

Кельвином было предложено для определения температуры использовать равенство

$$\frac{T_H}{T_X} = \frac{Q_H}{Q_X} \quad (6.3)$$

Следовательно, используя один объект в качестве нагревателя, а другой — в качестве холодильника и проводя между ними цикл Карно, можно определить отношение температур объектов путем измерения отношения теплоты, взятой от одного объекта и отданной другому. Полученная шкала температур не зависит от свойств рабочего (термометрического) вещества и называется абсолютной шкалой температур. Чтобы абсолютная температура (а не только отношение) имела определенное значение, было предложено принять разность термодинамических температур между точками кипения воды $T_{кв}$ и таяния льда $T_{тл}$, равной 100° . Принятие такого значения разности преследовало цель сохранения преемственности числового выражения термодинамической температурной шкалы от стоградусной температурной шкалы Цельсия. Таким образом, обозначая количество теплоты, полученной от нагревателя (кипящая вода) и отдаваемой холодильнику (тающий лед), соответственно через $Q_{кв}$ и $Q_{тл}$ и приняв $T_{кв} - T_{тл} = 100$, используя (6.3), получим

$$T_{кв} = \frac{Q_{кв}}{Q_{кв} - Q_{тл}} 100 \quad T_{тл} = \frac{Q_{тл}}{Q_{кв} - Q_{тл}} 100$$

Для любой температуры T нагревателя при неизменном значении температуры $T_{тл}$ холодильника и количества теплоты $Q_{тл}$, отдаваемой ему рабочим веществом машины Карно, будем иметь

$$T = \frac{Q}{Q_{кв} - Q_{тл}} 100 \quad (6.4)$$

Выражение (6.4) является уравнением *стоградусной термодинамической шкалы температур* и показывает, что значение температуры T по данной шкале линейно связано с количеством теплоты Q , полученной рабочим веществом тепловой машины при совершении ею цикла Карно, и, как следствие, не зависит от свойств

термометрического вещества. За один градус термодинамической температуры принимают такую разность между температурой тела и температурой таяния льда, при которой производимая по обратимому циклу Карно работа равна 1/100 части работы, совершаемой в цикле Карно между температурой кипения воды и таяния льда (при условии, что в обоих циклах количество теплоты, отдаваемой холодильнику, одинаково).

Из выражения (6.2) следует, что при максимальном значении $\eta=1$ должна быть равна нулю T_x . Эта наименьшая температура была названа Кельвином абсолютным нулем. Температуру по термодинамической шкале обозначают T К.

Если в выражение, описывающее газовый закон Гей-Люссака: $P_t = P_0(1+\alpha t) = P_0\alpha(\alpha^{-1}t)$ (где P_0 — давление при $t=0^\circ\text{C}$; α — температурный коэффициент давления), подставить значение температуры, равное $-\alpha^{-1}$, то давление газа P_t станет равным нулю. Естественно предположить, что температура $t = -\alpha^{-1}$, при которой обеспечивается предельное минимальное давление газа, сама является минимально возможной, и по абсолютной шкале Кельвина принята за нуль. Следовательно, абсолютная температура $T = \alpha^{-1} + t$.

Из закона Бойля — Мариотта известно, что для газов температурный коэффициент давления α равен температурному коэффициенту объемного расширения β . Экспериментально было найдено, что для всех газов при давлениях, стремящихся к нулю, в интервале температур $0—100^\circ\text{C}$ температурный коэффициент объемного расширения $\beta = 1/273,15$.

Таким образом, нулевое значение абсолютной температуры соответствует $t = -\alpha^{-1} = -\beta^{-1} = -273,15^\circ\text{C}$. Температура таяния льда по абсолютной шкале составит $T_0 = 273,15$ К.

Любая температура в абсолютной шкале Кельвина может быть определена как $T = 273,15\text{К} + t$ (где t — температура в $^\circ\text{C}$). Необходимо отметить, что один градус Кельвина (1К) соответствует одному градусу Цельсия (1°C), так как обе шкалы базируются на одинаковых реперных точках.

Термодинамическая шкала температур, основанная на двух реперных точках (температура таяния льда и кипения воды), обладала недостаточной точностью измерения. Практически трудно воспроизвести температуры указанных точек, так как они зависят от изменения давления, а также от незначительных примесей в воде. Кельвин и независимо от него Д. И. Менделеев высказали соображения о целесообразности построения термодинамической шкалы температур по одной реперной точке.

Консультативный комитет по термометрии Международного комитета мер и весов в 1954 г. принял рекомендацию о переходе к определению термодинамической шкалы с использованием одной реперной точки — тройной точки воды (точки равновесия воды в твердой, жидкой и газообразной фазах), которая легко воспроизводится в специальных сосудах с погрешностью не более $0,0001$ К. Температура этой точки принята равной $273,16$ К, т. е. выше температуры

точки таяния льда на 0,01 К- Такое число выбрано для того, чтобы значения температур по новой шкале практически не отличались от старой шкалы Цельсия с двумя реперными точками. Второй реперной точкой является абсолютный нуль, который экспериментально не реализуется, но имеет строго фиксированное положение.

В 1967 г. XIII Генеральная конференция по мерам и весам уточнила определение единицы термодинамической температуры в следующей редакции: «Кельвин— $1/273,16$ часть термодинамической температуры тройной точки воды». Термодинамическая температура может быть также выражена в градусах Цельсия: $t = T - 273,15$ К.

Использование второго закона термодинамики, предложенное Кельвином с целью установления понятия температуры и построения абсолютной термодинамической температурной шкалы, не зависящей от свойств термометрического вещества, имеет огромное теоретическое и принципиальное значение. Однако реализация указанной шкалы с использованием в качестве термометра тепловой машины, работающей по обратимому циклу Карно, практически неосуществима.

Термодинамическая температура эквивалентна газотермической, используемой в уравнениях, описывающих законы идеальных газов. Газотермическую температурную шкалу строят на основе газового термометра, в котором в качестве термометрического вещества используется газ, приближающийся по свойствам к идеальному газу. Таким образом, газовый термометр является реальным средством для воспроизведения термодинамической температурной шкалы.

Газовые термометры бывают трех типов: постоянного объема, постоянного давления и постоянной температуры.

Обычно применяют газовый термометр постоянного объема (рис. 6.1), в котором изменение температуры газа пропорционально изменению давления. Газовый термометр состоит из баллона 1 и соединительной трубки 2, заполненных через вентиль 3 водородом, гелием или азотом (для высоких температур). Соединительная трубка 2 подсоединена к трубке 4 двухтрубного манометра, у которого трубку 5 можно перемещать вверх или вниз благодаря гибкому соединительному шлангу 6. При изменении температуры объем системы, заполненной газом,

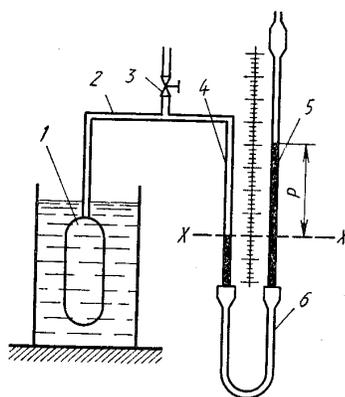


Рис. 6.1. Схема газового термометра

изменяется, и для приведения его к первоначальному значению трубку 5 вертикально перемещают до тех пор, пока уровень ртути в трубке 4 не совпадет с осью X—X. При этом столб ртути в трубке 5, отсчитанный от уровня X—X, будет соответствовать давлению газа P в баллоне. Обычно измеряемую температуру T определяют относительно некоторой точки отсчета, например по отношению к температуре тройной точки воды T_0 , при которой давление газа в баллоне будет P_0 . Искомая температура $T = T_0 \frac{P}{P_0}$

Газовые термометры используют в интервале $\sim 2—1300$ К. Погрешность газовых термометров находится в пределах $3 \cdot 10^{-3}—2 \cdot 10^{-2}$ К в зависимости от измеряемой температуры. Достижение такой высокой точности измерения — сложная задача, требующая учета многочисленных факторов: отклонения свойств реального газа от идеального, наличие примесей в газе, сорбцию и десорбцию газа стенками баллона, диффузию газа через стенки, изменение объема баллона от температуры, распределение температуры вдоль соединительной трубки.

В силу большой трудоемкости работы с газовыми термометрами предпринимались попытки изыскать более простые методы воспроизведения термодинамической температурной шкалы.

На основе проведенных в различных странах исследований на VII Генеральной конференции по мерам и весам в 1927 г. было принято термодинамическую шкалу заменить «практической» температурной шкалой и назвать ее *международной температурной шкалой*. Эта шкала была согласована со стоградусной термодинамической шкалой настолько тесно, насколько позволял уровень знаний того времени.

Для построения международной температурной шкалы было выбрано шесть воспроизводимых реперных точек, значения температуры которых по термодинамической шкале были тщательно измерены в различных странах с помощью газовых термометров и приняты наиболее достоверные результаты. С помощью реперных точек градуируются эталонные приборы для воспроизведения международной температурной шкалы. В интервалах между реперными точками значения температур рассчитывают по предлагаемым интерполяционным формулам, устанавливающим связь между показаниями эталонных приборов и температурой по международной шкале.

В 1948, 1960 и 1968 гг. в положения о международной температурной шкале был внесен ряд уточнений и дополнений, так как на основе усовершенствованных методов измерений были обнаружены отличия этой шкалы от термодинамической, особенно в области высоких температур, а также в связи с необходимостью продлить температурную шкалу до более низких температур. В настоящее время действует принятая на XIII конференции по мерам и весам усовершенствованная шкала под названием «международная практическая температурная шкала 1968» (МПТП—68). Определение

практическая» указывает, что эта температурная шкала в общем не совпадает с термодинамической. Температуры МПТШ—68 снабжаются индексом (T_{68} или 4s) •

МПТШ—68 базируется на 11 основных реперных точках, приведенных в табл. 6.1. Наряду с основными имеется 27 вторичных реперных точек, охватывающих диапазон температур от 13,956 до 3660 К (от —259,194 до 3387°С). Числовые значения температур, приведенные в таблице, соответствуют термодинамической шкале и определены с помощью газовых термометров.

Таблица 6.1
Основные реперные точки МПТШ—68

Состояние равновесия	Температура		Давление
	T_{68} , К	t_{68} , °С	P, МПа
Тройная точка водорода	13.81	–259.34	–
Точка кипения водорода	17.042	–256.108	33 330,6
Точка кипения водорода	20.28	–252.87	101 325
Точка кипения неона	27.102	–246.048	101 325
Тройная точка кислорода	54.361	–218.789	–
Точка кипения кислорода	90.188	–182.962	101 325
Тройная точка воды	273.16	0.01	–
Точка кипения воды	373.15	100	101 325
Точка затвердевания цинка	692.73	419.58	101 325
Точка затвердевания серебра	1235.08	961.93	101 325
Точка затвердевания золота	1337.58	1064.43	101 325

В качестве эталонного термометра в интервале температур от 13,81 до 903,89 К (630,74°С — точка затвердевания сурьмы — вторичная реперная точка) принимается платиновый термопреобразователь сопротивления. Этот интервал разбит на пять подынтервалов, для каждого из которых определены интерполяционные формулы в виде полиномов до четвертой степени. В интервале температур от 903,89 до 1337,58 К используется эталонный платина-платинородиевый термоэлектрический термометр. Интерполяционной формулой, связывающей термоэлектродвижущую силу с температурой, здесь является полином второй степени.

Для температур выше 1337,58 К (1064,43°С) МПТШ—68 воспроизводится с помощью квазимонохроматического термометра с использованием закона излучения Планка.

§ 6.3. Классификация средств измерений температуры

В различных областях науки и техники применяется множество принципов и средств измерения температуры. В нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности широкое применение нашли средства измерений температуры, классификация которых в

Таблица 6.2

Наиболее распространенные промышленные средства измерений температуры

Термометрическое свойство	Наименование средства	Диапазон измерения, °С
Изменение давления рабочего вещества при постоянном объеме	Манометрические термометры:	
	газовые	-150÷600
	жидкостные конденсационные	-150÷600 -50÷350
Термоэлектрический эффект (термоЭДС)	Термоэлектрические преобразователи	-200÷2200
Изменение электрического сопротивления	Металлические термопреобразователи сопротивления	-260÷1100
	Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления	-240÷300
Тепловое излучение	Пирометры излучения: квасимонохроматические спектрального отношения рдиационные	700÷6000
		1400÷2800
		50÷3500

зависимости от используемого термометрического свойства и диапазона измерения, приведена в табл. 6.2.

§ 6.4. Манометрические термометры

Принцип действия манометрических термометров основан на зависимости давления рабочего (термометрического) вещества в замкнутом объеме (термосистеме) от температуры. В соответствии с агрегатным состоянием 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°С. Диапазон измерения определяется наполнителем термосистемы. Термометры со специальными наполнителями (расплавленными металлами) пригодны для измерения температуры от 100 до 1000°С.

Термосистема термометра (рис. 6.2, а) состоит из термобаллона 1, капилляра 2 и манометрической пружины 3. Чувствительный элемент термометра (термобаллон) погружается в объект измерения

и термометрическое вещество в термобаллоне достигает температуры измеряемой среды. При изменении температуры рабочего вещества в термобаллоне изменяется давление, которое через капиллярную трубку передается на пружинный манометр, 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. Так, диаметр термобаллона находится в пределах 5—30 мм, а его длина 60—500 мм. Капилляр, соединяющий термобаллон с манометрической пружиной, представляет собой медную или стальную трубку с внутренним диаметром 0,1—0,5 мм. Длина капиллярной трубки в зависимости от эксплуатационных требований может быть от нескольких сантиметров до 60 м. Медные капилляры имеют стальную защитную оболочку, предохраняющую их от повреждений при монтаже и эксплуатации.

Для улучшения метрологических характеристик манометрических термометров к манометрическим пружинам предъявляют ряд требований. Так, с целью уменьшения температурной погрешности пружина должна иметь по возможности малый объем. Кроме того, пружина должна иметь возможность раскручиваться на большой угол и свободный ее конец должен обладать значительным тяговым усилием для механического перемещения дополнительных устройств.

В зависимости от конструкции измерительной системы манометрические системы бывают показывающими, самопишущими, бесшкальными со встроенными датчиками для дистанционной передачи показаний на расстояние.

Газовые манометрические термометры. Они предназначены для измерения температуры от -150 до $+600^{\circ}\text{C}$. Термометрическим веществом здесь служат гелий или азот. Принцип работы этих термометров основан на использовании закона Гей-Люссака:

$$P_t = P_0(1 + \beta t) \quad (6.5)$$

где P_0 и P_t — давление газа при температурах 0 и t , $^{\circ}\text{C}$; β — термический коэффициент давления газа, равный $1/273,15$ или $0,00366 \text{ K}^{-1}$.

Теоретически линейная связь между P_t и t в соответствии с (6.5) строго не сохраняется для реальных систем. Это связано с тем, что с изменением температуры изменяется объем термобаллона и с изменением давления изменяется объем манометрической пружины, а также происходит массообмен между термобаллоном и капиллярной трубкой. В то же время эти изменения незначительны и практически можно считать, что шкалы газовых манометрических термометров равномерны. Подставляя в (6.5) вместо P_t и t соответственно P_H и t_H , а также P_K и t_K , после несложных преобразований получим выражение для величины рабочего давления газового манометрического термометра:

$$\Delta P = P_K - P_H = P_H \frac{b(t_K - t_H)}{1 + bt_H} \quad (6.6)$$

где P_H и P_K — давления в термосистеме, соответствующие начальному t_H и конечному t_K значениям температуры по шкале прибора. Начальное давление заполнения системы P_H для заданного диапазона измерения температур может быть рассчитано из (6.6) при известном рабочем давлении манометрической пружины. Значение P_H в зависимости от диапазона шкалы прибора может быть различным примерно в пределах от 1 до 3 МПа. Чем больше P_H , тем больше ΔP 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 температуры. Однако если при измерении температура, окружающая капилляр и манометрическую пружину, отличается от температуры при градуировке, то возникает дополнительная погрешность. Для уменьшения этой погрешности стремятся уменьшить отношение

$(V_H - V_K)/V_T$ (где V_H и V_K — внутренние объемы пружины и капилляра), увеличивая размер термобаллона. Поэтому для газовых манометрических термометров характерны большие размеры термобаллонов (диаметр 20—30 мм, а длина 250—500 мм) и, как следствие этого, их значительная инерционность.

Погрешность от температуры окружающей среды часто компенсируют путем установки биметаллической пластины 4 (рис. 6.2, а), расположенной между манометрической пружинкой и указателем. При измерениях с повышенной точностью и при использовании длинных капилляров применяют дифференциальную систему, состоящую из основного манометрического термометра и компенсирующего (без термобаллона), капилляр которого примыкает к капилляру основного термометра. Таким образом, на указатель прибора действует разность перемещений двух манометрических пружин, что практически исключает температурную погрешность окружающей среды.

Жидкостные манометрические термометры. В качестве термометрического вещества здесь используется ртуть под давлением 10—15 МПа при комнатной температуре или толуол, ксилол, пропиловый

спирт, силиконовые жидкости и т. п. при давлении 0,5— 5 МПа. При ртутном заполнении диапазон измерений лежит в пределах —30—600°С, а для органических жидкостей 150—300°С.

Ввиду того что жидкость практически несжимаема, объем термобаллона в жидкостных манометрических термометрах в отличие от газовых должен быть согласован со свойствами используемой манометрической пружины.

При изменении температуры в диапазоне от начальной t_H до конечной t_K из термобаллона объемом V_T вытесняется жидкость объемом ΔV_T :

$$\Delta V_T = V_T (b_{ж} - 3a)(t_k - t_H) \quad (6.7)$$

где $\beta_{ж}$ — температурный коэффициент объемного расширения жидкости; a — коэффициент линейного расширения материала термобаллона.

Этот вытесненный объем вследствие охлаждения от t_K до температуры окружающего воздуха t_B дойдет до значения ΔV_M , при котором давление в термосистеме изменится на ΔP , а объем манометрической пружины изменится на ΔV_M причем величина ΔV_M должна быть равна ΔV_T :

$$\Delta V_M = \Delta V_T' = \frac{\Delta V_T}{1 + b_{ж}(t_k - t_H)} \quad (6.8)$$

Решая (6.7) и (6.8) совместно, получим

$$V_T = \frac{\Delta V_M [1 + b_{ж}(t_k - t_B)]}{(b_{ж} - 3a)(t_k - t_H)} \quad (6.9)$$

Из выражения (6.9) следует, что объем термобаллона тем меньше, чем больше диапазон измерения термометра и увеличивается с ростом ΔV_M .

Что касается рабочего давления ΔP , то в отличие от газовых термометров в жидкостных манометрических термометрах ΔP не зависит ни от диапазона измерения $t_K—t_H$, ни от начального давления P_H для определенного наполнителя. Здесь решающее значение имеет ΔV_M , т. е. для пружин различной жесткости в одном и том же диапазоне температур будет иметь место различное рабочее давление. В силу значительного давления в системе, предохраняющего жидкость от закипания, погрешность от изменения барометрического давления в жидкостных манометрических системах отсутствует.

В жидкостных манометрических термометрах, как и в газовых, имеет место погрешность от изменения температуры окружающей среды. Для уменьшения этой погрешности принимаются те же меры, которые принимались для газовых термометров. Кроме того, для компенсации указанной погрешности как для жидкостных, так и для газовых манометрических термометров, используют инварный компенсатор. Действие этого компенсатора основано на том, что в капиллярную трубку помещается проволока из инвара и рабочее

вещество оказывается в кольцевом зазоре между проволокой и стенкой капилляра. Диаметр проволоки выбирают таким, чтобы при повышении температуры в капилляре приращение кольцевого зазора было тем же, что и приращение объема жидкости в зазоре.

Манометрическим жидкостным термометрам свойственна гидростатическая погрешность, вызванная различным расположением манометра относительно термобаллона по высоте. Эта погрешность может быть устранена после монтажа прибора путем смещения указателя прибора на нужное значение по шкале.

Конденсационные манометрические термометры. В качестве термометрического вещества в этих термометрах используются легкокипящие жидкости, в частности пропан, этиловый эфир, ацетон, толуол, хлористый метил и т. п. В зависимости от используемого рабочего вещества диапазон измерений лежит в интервале от -50 до 350°C . Специально изготовленные конденсационные термометры применяются для измерения сверхнизких температур, например при заполнении гелием для измерения температуры от $0,8$ К. Термобаллон термометра (рис. 6.2, б) заполнен конденсатом примерно на $0,7-0,75$ объема, а над конденсатом находится насыщенный пар этой же жидкости. Капилляр в этих термометрах опущен в термобаллон так, чтобы его открытый конец находился в жидкости к в том случае, когда при максимальной температуре в термобаллоне остается часть жидкости. Капилляр и манометрическая пружина заполняются обычно высококипящей жидкостью, которая служит для передачи давления от термобаллона к манометрической пружине.

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

$$\frac{\partial P}{\partial T} = \frac{L}{L(V_{\text{п}} - V_{\text{ж}})} \quad (6.10)$$

где L — скрытая теплота испарения; $V_{\text{п}}$ и $V_{\text{ж}}$ — удельные объемы соответственно пара и жидкости.

Давление в термосистеме конденсационного термометра равно давлению насыщенного пара при температуре рабочей жидкости, которая, в свою очередь, равна температуре измеряемой среды с помещенным в нее термобаллоном. Зависимость давления насыщенного пара от температуры однозначна (до критической температуры), но нелинейна, вследствие чего шкалы конденсационных термометров имеют значительную неравномерность. Для получения равномерной шкалы конденсационные термометры снабжают специальным линеаризующим устройством. Рабочее давление в конденсационных термометрах зависит только от пределов измерения и закона изменения давления насыщенного пара от температуры.

В связи с тем что давление в термосистеме зависит только от измеряемой температуры, изменение температуры окружающей среды не оказывает влияния на показания прибора. Действительно, если повышается температура капилляра и манометрической пружины, то объем наполняющей их жидкости увеличивается и частично вытесняется в термобаллон, где часть объема насыщенного пара сконденсируется, и давление в термосистеме не изменится. В силу того что термобаллон в конденсационных термометрах может быть выполнен малых размеров, эти термометры обладают меньшей инерционностью, чем другие манометрические термометры. Кроме того, эти термометры более чувствительны, так как давление насыщенного пара резко изменяется с температурой.

Конденсационным термометрам присущи гидростатическая погрешность и погрешность от изменения барометрического давления. Первая из этих погрешностей компенсируется аналогично жидкостным манометрическим термометрам, а вторая имеет место лишь на начальном участке шкалы, когда давление в термосистеме невелико.

Манометрические термометры — достаточно простые устройства, позволяющие осуществлять автоматическую регистрацию измерений и передачу показаний на расстояние. В настоящее время промышленностью выпускаются манометрические термометры с унифицированными пневматическим и электрическим (постоянного тока) выходными сигналами классов точности 1; 1,5; 2,5. Важное достоинство этих термометров — возможность использования их на взрывоопасных объектах.

К их недостаткам относят необходимость частой поверки из-за возможной разгерметизации прибора и сложность ремонта, а также большие во многих случаях размеры термобаллона для газовых манометрических термометров.

Манометрические термометры, используемые в промышленности, имеют классы точности 1—4.

Передаточная функция манометрических термометров может быть представлена в виде (см. § 2.4)

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1} e^{-t \cdot p} \quad (6.11)$$

Значения постоянной времени T и времени запаздывания t приведены в табл. 6.3 [16].

Таблица 6.3

Динамические характеристики манометрических термометров

Условия определения характеристик	T , с	t , с	t/T
Нагрев от 30 до 100 °С в баке с водой	1	8	0.12
Нагрев от 40 до 60 °С в потоке воздуха (скорость 8 м/с)	2	12	0.17

§ 6.5. Термоэлектрические термометры

Измерение температуры термоэлектрическими термометрами — термоэлектрическими преобразователями (ТЭП) основано на использовании открытого в 1821 г. Зеебеком термоэлектрического эффекта.

Термоэлектрический преобразователь. Он представляет собой цепь, состоящую из двух или нескольких соединенных между собой разнородных проводников.

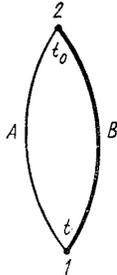


Рис. 6.3. Схема термоэлектрического преобразователя

На рис. 6.3 представлена термоэлектрическая цепь, состоящая из двух проводников (термоэлектродов) A и B . Места соединений термоэлектродов 1 и 2 называют спаями. Зеебеком было установлено, что если температуры спаев t и t_0 не равны, то в замкнутой цепи будет протекать электрический ток. Направление этого тока, называемого термотоком, зависит от соотношения температур спаев, т. е. если $t > t_0$, то ток протекает в одном направлении, а при $t < t_0$ — в другом.

При размыкании такой цепи на ее концах может быть измерена так называемая термоэлектродвижущая сила (термоЭДС). Следует отметить, что рассматриваемый эффект обладает и обратимым свойством, заключающимся в том, что если в такую цепь извне подать электрический ток, то в зависимости от направления тока один из спаев будет нагреваться, а другой охлаждаться (эффект Пельтье). Возникновение термотока или термоЭДС в современной физике объясняется тем, что различные металлы обладают различной работой выхода электронов и поэтому при соприкосновении двух разнородных металлов возникает контактная разность потенциалов. Кроме того, при различии температур концов проводников в них возникает диффузия электронов, приводящая к возникновению разности потенциалов на концах. Таким образом, оба указанных фактора — контактная разность потенциалов и диффузия электронов — являются слагаемыми результирующей термоЭДС цепи, значение которой зависит в итоге от природы термоэлектродов и разности температур спаев ТЭП. Для математической формализации соотношения между контактными термоЭДС и результирующей термоЭДС цепи необходимо принять ряд условий. Один термоэлектрод, от которого в спае с меньшей температурой ток идет к другому термоэлектроду, принято считать положительным, а другой — отрицательным. Например, если $t_0 < t$ (см. рис. 6.3) и ток в этом спае направлен от термоэлектрода A к термоэлектроду B , то термоэлектрод A — термположительный, а B — термоотрицательный. Обозначим контактную термоЭДС в спае между термоэлектродами A и B при температуре t как $e_{AB}(t)$. Указанная запись означает, что если термоэлектрод A

положительный и он в очередности написания идет первым, то термоЭДС $e_{AB}(t)$ имеет положительный знак. При принятом условии запись $e_{BA}(t)$ будет означать, что эта термоЭДС учтена с отрицательным знаком. В соответствии с законом Вольта, в замкнутой цепи из двух разнородных проводников при равенстве температур спаев термоток этой цепи равен нулю.

Исходя из этого, можно заключить, что если спаи 1 и 2 имеют одну и ту же температуру, например t_0 , то контактные термоЭДС в каждом спае равны между собой и действуют навстречу и потому результирующая термоЭДС такого контура $E_{AB}(t_0 t_0)$ равна нулю, т. е.

$$E_{AB}(t_0 t_0) = e_{AB}(t_0) - e_{AB}(t_0) = 0 \quad (6.12)$$

или с учетом того, что $e_{AB}(t_0) = -e_{BA}(t_0)$,

$$E_{AB}(t_0 t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BA}(t_0) = 0 \quad (6.13)$$

Рассматривая (6.13) с формальной точки зрения, можно принять следующее правило: результирующая термоЭДС контура равна арифметической сумме контактных термоЭДС, в символе которых очередность записи термоэлектродов соответствует направлению обхода контура (например, против движения часовой стрелки).

Для замкнутой цепи, показанной на рис. 6.3, результирующая термоЭДС составит

$$E_{AB}(tt_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0) \quad (6.14)$$

или

$$E_{AB}(tt_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) \quad (6.15)$$

Уравнение (6.15) называют основным уравнением ТЭП. Из него следует, что возникающая в контуре термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$ зависит от разности функций температур t и t_0 . Если сделать $t_0 = \text{const}$, то $e_{AB}(t_0) = c = \text{const}$ и

$$E_{AB}(tt_0)_{t_0=\text{const}} = e_{AB}(t) - c = f(t) \quad (6.16)$$

При известной зависимости (6.16) путем измерения термоЭДС в контуре ТЭП может быть найдена температура t в объекте измерения, если температура $t_0 = \text{const}$. Спай, погружаемый в объект измерения температуры, называют рабочим спаем или рабочим концом, а спай вне объекта называют свободным спаем (концом).

Следует отметить, что в явном виде зависимость (6.16) для конкретно используемых термоэлектродных материалов пока не может быть получена аналитически с достаточной точностью. Поэтому при измерении температур эта зависимость для различных используемых ТЭП устанавливается экспериментально путем градуировки и последующего табулирования или построением графика зависимости термоЭДС от температуры. В процессе градуировки температура свободных концов ТЭП должна поддерживаться постоянной

и значение ее стандартизовано в СССР на уровне $t_0 = 0^\circ\text{C}$. Примерный вид градуировочной кривой ТЭП показан на рис. 6.5.

Необходимо подчеркнуть, что генерируемая в контуре ТЭП термоЭДС зависит только от химического состава термоэлектродов и температуры спаев и не зависит от геометрических размеров термоэлектродов и размера спаев.

Включение измерительного прибора в цепь термоэлектрического преобразователя.

Для измерения термоЭДС ТЭП в его цепь включают измерительный прибор по одной из двух схем (рис. 6.4).

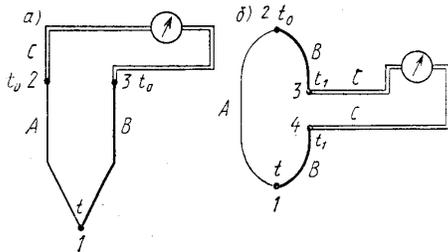


Рис. 6.4. Схемы включения измерительного прибора в цепь термоэлектрического преобразователя

Обе схемы включения прибора можно представить как включение в цепь по крайней мере еще одного, третьего проводника С. При включении измерительного прибора в разрыв спаев свободного конца (рис. 6.4, а) ТЭП имеет один рабочий спай / и два свободных спаев 2

и 3.

При включении по схеме рис. 6.4, б (в разрыв одного из термоэлектродов) ТЭП имеет четыре спаев: рабочий 1, свободный 2 и два нейтральных 3 и 4 при постоянной температуре t_1 . Покажем, что, несмотря на внешнее различие схем, термоЭДС, развиваемые в обоих случаях, одинаковы, если температуры концов третьего проводника С будут равны. Для схемы рис. 6.4, а имеем

$$E_{ABC}(t_0 t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) \quad (6.17)$$

Если температуры всех спаев одинаковы, то

$$E_{ABC}(t_0 t_0 t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = 0$$

Тогда

$$e_{BA}(t_0) = e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) \quad (6.18)$$

Подставляя (6.18) в (6.17), получим

$$E_{ABC}(t_0 t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0) = e_{AB}(t_0) - e_{AB}(t_0) = 0 \quad (6.19)$$

т. е. уравнение (6.19) полностью совпадает с основным уравнением ТЭП (6.15).

Для цепи (рис. 6.4, б) получим

$$E_{ABC}(t_1 t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_1) + e_{CB}(t_1) + e_{BA}(t_0)$$

Учитывая, что $e_{BC}(t_1) = -e_{CB}(t_1)$ и $e_{BA}(t_0) = -e_{AB}(t_0)$, запишем

$$E_{ABC}(tt_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0) = E(tt_0) \quad (6.20)$$

т. е. уравнение (6.20) также совпадает с (6.15).

Таким образом, следствием совпадения уравнений (6.19) (6.20) с (6.15) является то, что термоЭДС ТЭП не изменяется от введения в его цепь третьего проводника при равенстве температур его концов. Этот вывод легко распространить на любое число проводников, подключаемых в контур ТЭП, при условии равенства температур концов этих проводников. Указанный вывод может быть отнесен также к подключаемому измерительному прибору.

Итак, подключение измерительного прибора в контур ТЭП по обеим схемам (рис. 6.4, а, б) одинаково правомочно; при этом термоЭДС, генерируемая в ТЭП, не искажается.

Отметим, что при неравенстве температур спаев 2 и 3 (рис. 6.4, а) или 3 и 4 (рис. 6.4, б) в контуре образуется паразитная термоЭДС.

Поправка на температуру свободных концов термоэлектрического преобразователя. Если температура t_0' свободных концов отлична от нуля, то показание измерительного прибора при температуре t рабочих концов будет соответствовать генерируемой в это случае термоЭДС, равной

$$E_{AB}(tt_0') = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0') \quad (6.21)$$

Как отмечалось, градуировочная таблица или график (рис. 6.5) зависимости термоЭДС от температуры соответствует условию, когда температура t_0 свободных концов ТЭП равна нулю. Если это условие сохраняется в процессе измерения, то

$$E_{AB}(tt_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)$$

Вычтем из последнего выражение (6.21), тогда

$$E_{AB}(tt_0) = E_{AB}(tt_0') - [e_{AB}(t_0') - e_{AB}(t_0)]$$

или

$$E_{AB}(tt_0) = E_{AB}(tt_0') + E_{AB}(t_0't_0) \quad (6.22)$$

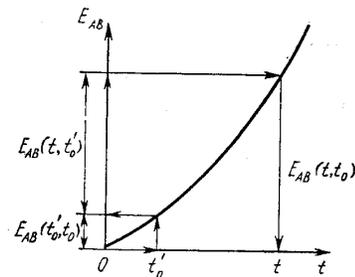


Рис. 6.5. Графическое введение поправки на температуру свободных концов термоэлектрического преобразователя

Здесь $E_{AB}(tt_0')$ представляет собой поправку, определяемую из градуированных данных используемого ТЭП по измеренному значению температуры t_0' его свободных концов. Найденное значение $E_{AB}(t_0't_0)$ прибавляют к измеренному прибором значению $E_{AB}(tt_0')$, если $t_0' > t_0 = 0$, и отнимают от него при $t_0' < t_0 = 0$. По значению полученного

результата из градуировочной таблицы или графика находят искомую температуру t (рис. 6.5).

Нормальный термоэлектрод. Для оценки свойств ТЭП, составленных из различных пар разнородных термоэлектродов, достаточно знать значения термоЭДС, развиваемые термоэлектродными парами в паре с одним из термоэлектродов, называемым нормальным.

В качестве нормального стандарта предусматривается термоэлектрод из химически чистой платины. Действительно, пусть некоторые термоэлектроды из материалов A и B в паре с нормальным термоэлектродом $П$ создают термоЭДС соответственно $E_{АП}(t, t_0)$ и $E_{ВП}(t, t_0)$. При этом рабочий спай каждой из пар имеет одну и ту же температуру t , а свободные концы — одинаковую температуру t_0 . Запишем для каждой пары основное уравнение ТЭП:

$$E_{АП}(t, t_0) = e_{АП}(t) - e_{АП}(t_0)$$

$$E_{ВП}(t, t_0) = e_{ВП}(t) - e_{ВП}(t_0)$$

Вычитая из первого уравнения второе, имеем

$$E_{АП}(t, t_0) - E_{ВП}(t, t_0) = [e_{АП}(t) + e_{ВП}(t_0)] - [e_{АП}(t_0) + e_{ВП}(t)]$$

С учетом выражения (6.18) получим

$$E_{АП}(t, t_0) - E_{ВП}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0)$$

Правая часть уравнения представляет собой формулу искомой термоЭДС для ТЭП, составленного из термоэлектродов A и B , поэтому запишем

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{АП}(t, t_0) - E_{ВП}(t, t_0) \quad (6.23)$$

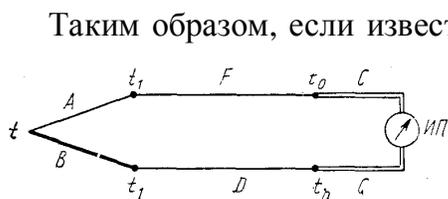


Рис. 6.6. Схема соединения термоэлектрического преобразователя термокомпенсационными проводами с измерительным прибором:
 t — температура рабочего конца термоэлектрического преобразователя; t_1 и t_2 — температуры мест соединения проводов; C — соединительный провод

Таким образом, если известна термоЭДС двух проводников A и B в паре с третьим — нормальным термоэлектродом $П$, то можно расчетным путем, используя уравнение (6.23), определить значение термоЭДС ТЭП, выполненного из двух термоэлектродов A и B . В справочных таблицах приводятся значения термоЭДС различных материалов в паре с платиной при $t = 100^\circ\text{C}$ и $t_0 = 0^\circ\text{C}$.

Удлиняющие термоэлектродные провода и термостатирование свободных концов ТЭП. Для исключения влияния температуры измеряемого объекта на свободные концы ТЭП их следует удалить из зоны с переменной температурой. Для этого целесообразно удлинять не сами термоэлектроды преобразователя, а, ограничиваясь разумной длиной преобразователя с точки зрения

его монтажа и стоимости термоэлектродов, продлевать их с помощью специальных удлиняющих термоэлектродных проводов. Если термоэлектродные провода правильно выбраны и подключены к ТЭП, то места их подключения к измерительному прибору рассматривают как свободные концы.

Условия, которым должны отвечать термоэлектродные провода, определим из рассмотрения схемы рис. 6.б.

Развиваемая в цепи термоЭДС

$$E = e_{AB}(t) + e_{BD}(t_1) + e_{DC}(t_0) + e_{CF}(t_0) + e_{FA}(t_1)$$

Если принять, что все спаи в цепи имеют одинаковую температуру, равную t_1 , то

$$e_{AB}(t_1) + e_{BD}(t_1) + e_{DC}(t_1) + e_{CF}(t_1) + e_{FA}(t_1) = 0$$

Вычитая это выражение из предыдущего и учитывая для соответствующих членов каждого выражения уравнение (6.18), имеем

$$E = [e_{AB}(t) - e_{AB}(t_1)] + [e_{FD}(t_1) - e_{FD}(t_0)] = E_{AB}(t, t_1) + E_{FD}(t_1, t_0) \quad (6.24)$$

Пусть термоэлектродные провода F и D подобраны такими, что они в паре имеют термоэлектрическую характеристику, совпадающую с характеристикой используемого термоэлектрического преобразователя AB в интервале температур от $t_0 = 0^\circ\text{C}$ до $t \gg 100 \div 120^\circ\text{C}$, т. е.

$$E_{FD}(t_1, t_0) = E_{AB}(t_1, t_0) \quad (6.25)$$

Подставляя (6.25) в (6.24), получим

$$E = E_{AB}(t, t_1) + E_{AB}(t_1, t_0) = E_{AB}(t, t_0) \quad (6.26)$$

Из выражения (6.26) следует, что включение в цепь ТЭП термоэлектродных проводов, подобранных в соответствии с (6.25), не создает в цепи паразитных термоЭДС, и потому не искажается результат измерения.

В практике измерения температуры выбор термоэлектродных проводов для используемых ТЭП осуществляют по таблицам, приводимым в [16].

Свободные концы, удаленные от объекта измерения термоэлектродными проводами, подлежат термостатированию. Термостатирование свободных концов при $t=0^\circ\text{C}$ осуществляется в лабораторных условиях. Это достигается путем погружения свободных концов преобразователя в пробирку с маслом, находящуюся в сосуде Дьюара с тающим льдом.

Для поддержания свободных концов при температуре, отличной от 0°C , используют специальные коробки, снабженные простым автоматическим биметаллическим терморегулятором. Обычно поддерживается температура $(50 \pm 0,5)^\circ\text{C}$.

В ряде случаев при измерении термоЭДС милливольтметром применяют компенсирующий мост (рис. 6.7) для автоматического введения поправки на температуры свободных концов преобразователя. Компенсирующий мост представляет собой электрический неравновесный мост с постоянными манганиновыми резисторами R_1, R_2, R_3 и медным резистором R_M . Диагональ ab питания моста подключена к стабилизированному источнику питания ИПС через нагрузочное сопротивление R_H , предназначенное для изменения

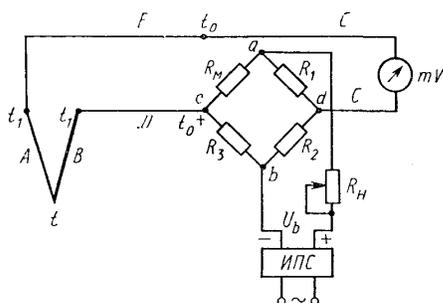


Рис. 6.7. Схема автоматической компенсации температуры свободных концов термоэлектрического преобразователя

напряжения питания моста при переходе к преобразователям с различной градуировкой. Измерительная диагональ cd моста включена в разрыв между удлиняющим термоэлектродным проводом F и соединительным проводом C . При температуре свободных концов $t_0=0^\circ\text{C}$ мост находится в равновесии, т. е. напряжение в диагонали cd равно нулю. Если температура свободных концов, например, выросла и стала t_0 , то сопротивление резистора R_M ,

расположенного рядом с концами удлинительных проводов F и D , также вырастет, в результате чего в диагонали появится напряжение U_{cd} . Это возникшее напряжение компенсирует недостающую термоЭДС на значение поправки, т. е. $U_{cd}=E_{AB}(t_0't_0)$.

Таким образом, на входе измерительного прибора $E_{AB}(t_0') + U_{cd} = E_{AB}(t_0)$. Погрешность выпускаемых в настоящее время компенсирующих мостов для ТЭП стандартных градуировок при изменении температуры t_0 в пределах $0-50^\circ\text{C}$ составляет $\pm 3^\circ\text{C}$.

Способы соединения ТЭП. Соединяя различным образом между собой термоэлектрические преобразователи, можно для конкретных задач измерения значительно улучшить точность.

Так, при необходимости измерения непосредственно разности температур используется дифференциальный способ соединения ТЭП, показанный на рис. 6.8, а. Здесь оба конца 1 и 2 ТЭП являются рабочими и каждый из них погружается соответственно в среду с температурой t_1 и t_2 . Нейтральные концы 3 и 4 должны иметь одинаковые температуры t_0 . По развиваемой в контуре термоЭДС $E(t_1t_2)$ определяют разность температур t_1-t_2 , используя соответствующий участок градуировочной кривой или таблицы ТЭП. Этот участок градуировки определяют измерением одной из температур t_2 или t_1 .

Если температура t измеряемого объекта незначительно отличается от температуры t_0 свободных концов ТЭП, то используется термобатарея (рис. 6.8, б), представляющая собой систему из n последовательно включенных ТЭП. Спаи, имеющие температуру t , являются рабочими и располагаются в объекте измерения, а свобод-

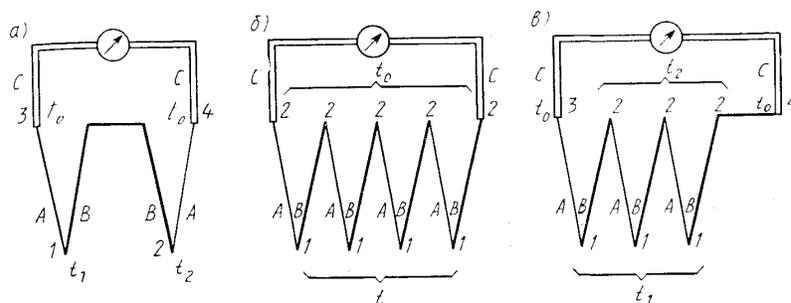


Рис. 6.8. Схемы соединений термоэлектрических преобразователей

ные концы, имеющие температуру t_0 располагаются вне объекта. Суммарная термоЭДС в контуре термобатареи в n раз больше, чем в отдельном ТЭП, т. е. равна $nE_{AB}(t_0)$, благодаря чему увеличивается чувствительность измерения. Термобатареи, собранные в соответствии со схемой рис. 6.8, в. называют дифференциальными преобразователями, с помощью которых измеряют малую разность температур. Здесь спаи 1 и 2 являются рабочими и располагаются в средах соответственно с температурой t_1 и t_2 , а спаи 3 и 4 — нейтральные с одинаковой температурой t_0 . Результирующая термоЭДС здесь равна $nE_{AB}(t_1 t_2)$.

Требования к материалам термоэлектродов и устройство ТЭП. Несмотря на то что любые два проводника создают в паре между собой термоЭДС, лишь ограниченное число термоэлектродов используется для создания ТЭП.

К материалам термоэлектродов предъявляется ряд требований: однозначная и по возможности близкая к линейной зависимость термоЭДС от температуры, жаростойкость и механическая прочность с целью измерения высоких температур; химическая инертность; термоэлектрическая однородность материала проводника по длине, что позволяет восстанавливать рабочий спай без переградуировки, а также менять глубину его погружения; технологичность изготовления с целью получения взаимозаменяемых по термоэлектрическим свойствам материалов; дешевизна и, наконец, наиболее существенное — стабильность и воспроизводимость термоэлектрических свойств, что позволяет создать стандартные градуировки. Ни один из существующих в настоящее время материалов

Таблица 6.4
Термоэлектрические преобразователи стандартных градуировок

Термоэлектрический преобразователь	Градуировка	ТермоЭДС при $t = 100^{\circ}\text{C}$, $t_0 = 0^{\circ}\text{C}$, мВ	Химический состав термоэлектродов		Диапазон измеряемых температур при длительном измерении, $^{\circ}\text{C}$	Пределная температура при кратковременном применении, $^{\circ}\text{C}$	Допустимые отклонения (погрешность невоспроизводимости), $^{\circ}\text{C}$
			положительный	отрицательный			
Хромель — копель (ТХК)	ХК ₆₈	$6,90 \pm 0,30$	Хромель (89% Ni, 9,8% Cr, 1% Fe, 0,2% Mn)	Копель (55% Cu, 45% Ni)	-50—600	800	$\pm (2,2—5,8)$
Хромель — алюмель (ТХА)	ХА ₆₈	$4,10 \pm 0,15$	То же	Алюмель (94% Ni, 2% Al, 2,5% Mn, 1% Si, 0,5% Fe)	-50—1000	1300	$\pm (4,0—9,7)$
Платинородий — платина (ТПП)	ПП ₆₈	$0,64 \pm 0,03$	Платинородий (90% Pt, 10% Rh)	Платина (100% Pt)	0—1300	1600	$\pm (1,2—3,6)$
Платинородий — платинородий (ТПР)	ПР 30/6 ₆₈	0,431 (при $t = 300^{\circ}\text{C}$)	Платинородий (70% Pt, 30% Rh)	Платинородий (94% Pt, 6% Rh)	300—1600	1800	$\pm (3,2—5,2)$
Вольфрамрений — вольфрамрений (ТВР)	ВР 5/20 ₆₈	1,33	Сплав вольфрама с рением (95% W, 5% Re)	Сплав вольфрама с рением (80% W, 20% Re)	0—2200	2500	$\pm (5,4—9,7)$

не удовлетворяет полностью всем требованиям, в результате чего для различных пределов измерения используются термоэлектроды из различных материалов.

В настоящее время в СССР в основном применяются пять стандартных градуировок ТЭП, характеристики которых приведены в табл. 6.4.

Для предохранения от механических повреждений и вредного влияния объекта измерения термоэлектроды преобразователя помещают в защитную арматуру.

На рис. 6.9, а показано устройство стандартного термоэлектрического термометра.

В жесткой защитной гильзе 1 расположены термоэлектроды 3 с надетыми на них изоляционными бусами 4. Спай 2 касается дна защитной гильзы или может быть изолирован от него с помощью керамического наконечника. К термоэлектродам в головке 8 винтами 6 розетка 5 подсоединяются удлинительные провода 7. Защитная гильза с содержимым вводится в объект измерения и крепится на нем с помощью штуцера 9. Для обеспечения надежного контакта спай 2 изготавливают сваркой, реже пайкой скруткой (для высокотемпературных ТЭП). Защитную гильзу 1 выполняют в цилиндрической или конической труб- из газонепроницаемых материалов диаметром примерно 15—25 мм и длиной в зависимости от потребности объекта измерения от 100 до 2500— 3500 мм. Материалом для защитной гильзы обычно служат различные стали. Для более высоких температур используются гильзы из тугоплавких соединений, а также кварц и фарфор. Диаметр термоэлектродов составляет 2—3 мм, кроме термоэлектродов платиновой группы, диаметр которых 0,5 мм, что связано с их высокой стоимостью. Стандартные ТЭП выпускают одинарными, двойными и поверхностными — для измерения температуры стенок объекта, когда доступ внутрь объекта затруднителен или невозможен.

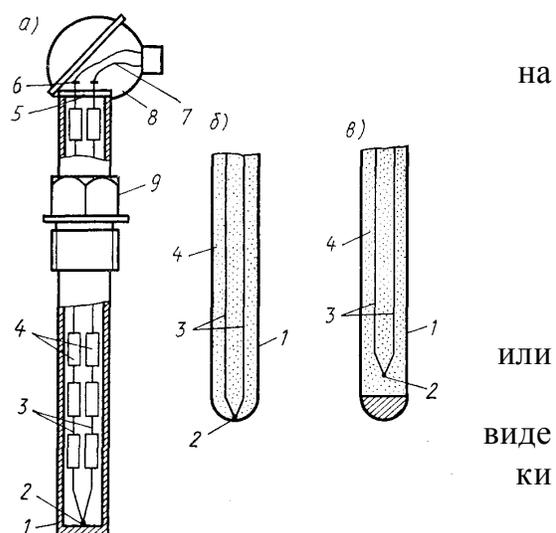


Рис. 6.9. Конструкция термоэлектрических термометров

В настоящее время широкое применение находят термоэлектрические термометры кабельного типа (рис. 6.9, б, в).

В тонкостенной оболочке 1 размещены термоэлектроды 3, изолированные друг от друга, а также от стенки оболочки термостойким керамическим порошком 4. Рабочий спай 2 может иметь контакт с оболочкой (рис. 6.9, б) или изолируется от нее (рис. 6.9, в). Оболочку выполняют из высоколегированной нержавеющей стали с наружным диаметром 0,5—6 мм, длиной 10—30 м. Благодаря указанным размерам кабельные термоэлектрические термометры являются весьма гибкими при достаточной механической прочности. Выпускаемые хромель-алюмелевые и хромель-копелевые кабельные термометры можно использовать в интервале температур от —50 до 300°С при давлении 40 мПа. Внутрь оболочки кабеля помещены от одного до трех ТЭП.

Выбор соответствующей конструкции ТЭП осуществляют в зависимости от конкретных условий измерения из [16].

Динамическая характеристика термоэлектрических термометров в общем виде описывается передаточной функцией

$$W(p) = \frac{K}{Tp + 1} e^{-t \cdot p}$$

Значения постоянной времени T и транспортного запаздывания t зависят от конструктивных размеров и используемых материалов защитного чехла. Для выпускаемых в настоящее время термоэлектрических термометров эти величины находятся в пределах $T=1,5 \div 8$ мин и $t=9 \div 30$ с, а $t/T=0,11 \div 0,78$ [43].

§ 6.6. Средства измерений сигналов термоэлектрических термометров

В качестве средств измерений, работающих в комплекте с ТЭП, используются милливольтметры магнитоэлектрической системы, потенциометры и нормирующие преобразователи.

Магнитоэлектрический милливольтметр. Схема его измерительного механизма показана на рис. 6.10. Механизм состоит из рамки 2, вращающейся в кольцевом зазоре между полюсными наконечниками постоянного магнита NS и цилиндрическим сердечником 1 из мягкой стали. Рамка 2 вместе со стрелкой 7 для отсчета показаний по шкале 6 прибора закреплены на кернах 5, опирающихся на подпятники 3. Установленные на кернах спиральные пружинки 4, создающие противодействующий повороту рамки момент, крепятся одним концом к оси 5, а другим — к неподвижной части прибора. Кроме того, эти пружинки являются токоподводящими элементами рамки. Рамка, закрепленная на кернах, изготавливается как с горизонтальной, так и с вертикальной осью вращения.

Для обеспечения большей чувствительности милливольтметров, гальванометров и самопишущих милливольтметров их рамка крепится на вертикальных ленточных растяжках из фосфористой бронзы. Эти ленты при повороте рамки, скручиваясь, создают противодействующий момент, и одновременно по ним осуществляется подвод

тока в рамку. Рамка представляет собой прямоугольник длиной l и шириной $2r$ и состоит из n витков тонкой медной проволоки, скрепленных между собой лаком. Благодаря сердечнику I , расположенному внутри рамки, последняя оказывается под действием равномерного и радиального магнитного поля, в силу чего, независимо от угла поворота рамки, плоскость ее оказывается параллельной вектору магнитной индукции B . Таким образом, при протекании по рамке электрического тока I на подвижную систему действует магнитоэлектрический момент

$$M_{MЭ} = 2rlBI \quad (6.27)$$

Противодействующий момент M_{np} , создаваемый спиральной пружиной или подвеской, равен

$$M_{np} = Wj \quad (6.28)$$

где W — удельный противодействующий момент.

При некотором угле поворота φ имеем: $M_{np} = M_{MЭ}$ т. е.

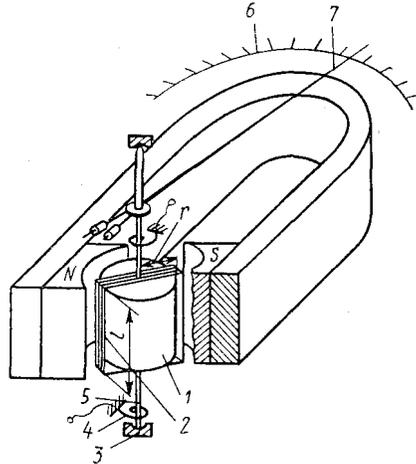


Рис. 6.10. Схема измерительного механизма магнитоэлектрического милливольтметра

$$Wj = 2rlBI \quad \text{или} \quad Wj = \frac{2rlBI}{W} \quad (6.29)$$

где $S_I = \frac{2rlB}{W} = \frac{j}{I}$ — чувствительность измерительного механизма к току, рад/А.

Для получения зависимости угла поворота рамки от напряжения U , подведенного к зажимам прибора с внутренним сопротивлением R_M , из (6.29) имеем

$$j = S_I \frac{U}{R_M} = S_U U \quad (6.30)$$

где $S_U = \frac{S_I}{R_M}$ — чувствительность прибора к напряжению.

Из (6.30) следует, что чувствительность прибора к напряжению тем меньше чувствительности к току, чем больше внутреннее сопротивление прибора.

Измерение термоЭДС милливольтметром осуществляется по схеме рис. 6.11. Генерируемая ТЭП термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$ создает в замкнутой цепи ток

$$I = \frac{E_{AB}(tt_0)}{R_{AB} + R_{FD} + R_C + R_y + R_P + R_D} \quad (6.31)$$

где $R_{AB}, R_{FD}, R_C, R_y, R_p, R_D$ — сопротивления термоэлектродов AB , удлинительных проводов FD , соединительных линий C , уравнивательной катушки, рамки милливольтметра и добавочной катушки соответственно; $R_{BH} = (R_{AB} + R_{FD} + R_C + R_y)$ — внешнее по отношению к зажимам ab прибора сопротивление цепи; $R_M = (R_p + R_D)$ — внутреннее сопротивление милливольтметра. Представим (6.31) в виде

$$U_{ab} = IR_M = E_{AB}(tt_0) - IR_{BH} \quad (6.32)$$

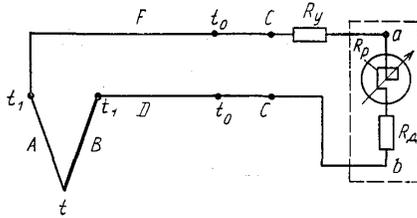


Рис. 6.11. Схема измерения термоЭДС милливольтметром

Из (6.32) можно заключить, что измеряемое милливольтметром напряжение U_{ab} , подведенное к его зажимам ab , всегда меньше, чем ЭДС в цепи, на значение падения напряжения IR_{BH} во внешней цепи, обусловленного проходящим в контуре током.

В силу того что сведение к нулю IR_{BH} при использовании милливольтметра невозможно, принципиально невозможно непосредственное измерение ЭДС милливольтметром. В то же время при соблюдении определенных условий измерения с некоторой погрешностью можно принять, что показания милливольтметра однозначно зависят от развиваемой в цепи термоЭДС. Подставляя (6.31) в (6.29), имеем

$$j = S_1 \frac{E_{AB}(tt_0)}{R_{BH} + R_M} \quad (6.33)$$

Отсюда следует, что если бы имело место $R_{BH} + R_M = \text{const}$, то между показанием ϕ милливольтметра и измеряемой ЭДС была бы однозначная зависимость и шкалу милливольтметра можно было бы градуировать в градусах, соответствующих термоЭДС для данного преобразователя AB . В то же время как R_{BH} , так и R_M изменяются в зависимости от температуры окружающей среды, что приводит к погрешности измерения. Покажем, что уменьшение указанной погрешности может быть достигнуто путем уменьшения отношения R_{BH}/R_M и уменьшения R_p/R_M . Преобразуем (6.31) к виду

$$U_{ab} = IR_M = \frac{E_{AB}(tt_0)}{1 + R_{BH}/R_M} \quad (6.34)$$

Из выражения (6.34) видно, что чем меньше отношение R_{BH}/R_M по сравнению с единицей, тем в меньшей мере изменение этого отношения, вызванного, например, изменением температуры окружающей среды, сказывается на линейной связи между U_{ab} и $E_{AB}(tt_0)$. Уменьшение отношения R_{BH}/R_M возможно за счет увеличения R_M .

Так как рамка милливольтметра выполнена из медного провода с сопротивлением R_p , то R_M увеличивают за счет увеличения последовательно соединенного с рамкой добавочного сопротивления R_D , выполненного в виде манганиновой катушки. Значительное увеличение R_M приводит к уменьшению чувствительности S_U милливольтметра. Обычно $R_M = 100 \div 500$ Ом, а отношение $R_p/R_M \leq 1/3$, что значительно уменьшает температурный коэффициент прибора. Значение R_{BH} стандартизовано в пределах 0,6—25 Ом и указано на шкале прибора.

Таким образом, использование градусной шкалы милливольтметра возможно, если градуировка ТЭП соответствует градуировке, указанной на шкале. При этом необходимо сопротивление внешней линии подогнать к значению R_{BH} , указанному на шкале прибора, с помощью подгоночного сопротивления R_y . Если милливольтметр имеет милливольттовую шкалу, то она наносится без учета сопротивления внешней линии и показания по шкале соответствуют напряжению на зажимах, т. е. u_{ab} , ^{по} которому при известных R_{BH} и R_M определяют из (6.34) термоЭДС для ТЭП любой градуировки, а затем значение измеряемой температуры по градуировочным таблицам.

Милливольтметры, предназначенные для работы в комплекте с ТЭП, по конструктивному исполнению бывают переносными и стационарными (щитовыми).

Стационарные милливольтметры имеют только градусную шкалу. Промышленностью выпускаются показывающие, самопишущие и регулирующие милливольтметры классов точности 0,5; 1,0; 1,5; 2,0.

Переносные милливольтметры имеют две шкалы (градусную и милливольттовую) или только одну милливольттовую. Эти приборы выполняют как показывающие и имеют классы точности: 0,2; 0,5; 1,0.

Потенциометры. Принцип действия этих приборов основан на уравнивании (компенсации) неизвестной ЭДС известным падением напряжения, создаваемым током от дополнительного источника. Схема, поясняющая компенсационный метод измерения ЭДС, показана на рис. 6.12. Замкнутый контур I содержит дополнительный источник тока напряжением E_e и реохорд

(компенсационный резистор) R_{ab} . Этот контур называют компенсационным. Контур измерения II включает в себя ТЭП, термоЭДС $E_{AB}(t, t_0)$ которого измеряется, и высокочувствительный гальванометр, выполняющий функцию нуль-индикатора (НИ), а также

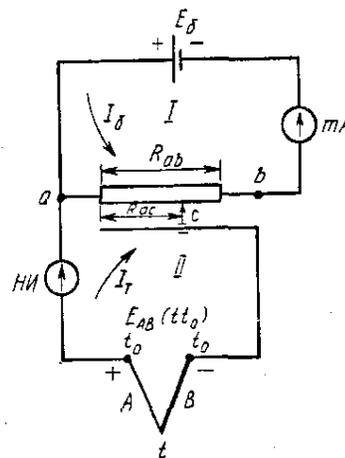


Рис. 6.12. Принципиальная схема потенциометра

часть R_{ac} реохорда от точки a до подвижного контакта движка c . Функция нуль-индикатора состоит в обнаружении тока в цепи. Измеряемый источник $E_{AB}(tt_0)$ включен навстречу дополнительному источнику E_{δ} так, что токи от обоих источников на участке R_{ac} идут в одном направлении. Если обозначить ток, проходящий в контуре I , через I_{δ} (рабочий ток), а ток для контура II при некотором положении движка C через I_T , то на основании закона Кирхгофа для контура II справедливо равенство $E_{AB}(tt_0) = I_T R_{BH} + I_T R_{НИ} + I_T R_{ac} + I_{\delta} R_{ac}$, где $R_{НИ}$ и R_{BH} – сопротивление нуль-индикатора и внешних проводов, включая ТЭП, откуда $I_T = [E_{AB}(tt_0) - I_{\delta} R_{ac}] / (R_{BH} + R_{НИ} + R_{ac})$. Перемещая движок C , можно добиться того, чтобы I_T стал равным нулю. Это определится показанием нуль-индикатора, и тогда

$$E_{AB}(tt_0) = I_{\delta} R_{ac} \quad (6.35)$$

Полученное равенство указывает на то, что если в контуре, где расположен источник измеряемой ЭДС, ток равен нулю, то падение напряжения на участке R_{ac} служит мерой измеряемой ЭДС. Преимуществом компенсационного метода измерения термоЭДС является отсутствие тока в цепи в момент измерения. Это исключает необходимость учета значений сопротивления внешней цепи и изменения сопротивления этой цепи от температуры. Компенсирующее напряжение $I_{\delta} R_{ac}$ можно изменять двумя методами:

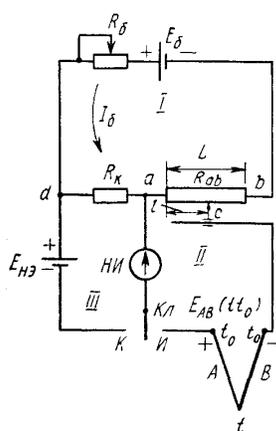


Рис. 6.13. Схема потенциометра с постоянной силой рабочего тока

- 1) поддерживая значение тока I_{δ} на постоянном уровне, изменять сопротивление R_{ac} ;
- 2) сохраняя сопротивление R_{ac} постоянным, изменять значение рабочего тока I_{δ} .

Наибольшее распространение получил потенциометр с постоянной силой рабочего тока, показанный на рис. 6.13.

Для контроля за постоянством тока I_{δ} предусмотрен дополнительный контур III — контур нормального элемента. Нормальный элемент представляет собой образцовую меру ЭДС, равную $E_{НЭ} = 1,0186$ В и сохраняющую это значение при кратковременных и малых нагрузках в течение длительного времени.

При установке ключа $Кл$ в положение $К$ (контроль) проводят сравнение ЭДС нормального элемента $E_{НЭ}$ с падением напряжения U_{da} на постоянном резисторе R_K . Если при этом стрелка нуль-индикатора не на нуле, т. е. в контуре III проходит ток, а это означает, что $E_{НЭ} \neq U_{da}$, то с помощью реостата R_{δ} изменяют ток I_{δ} в контуре I до тех пор, пока стрелка нуль-индикатора не установится

на нуле. Тогда $E_{HЭ} = U_{da}$. Так как $U_{da} = I_6 R_K$ и $R_K = 509,3$ Ом, то $I_6 = E_{HЭ} / R_K = 1,0186 / 509,3 = 2$ мА. После стандартизации значения тока I_6 ключ K_1 переводят в положение II (измерение) и перемещают движок C реохорда R_{ab} до установления стрелки нуль-индикатора на нуле. При этом

$$E_{AB}(tt_0) = I_6 R_{ac} = E_{HЭ} R_{ac} / R_K$$

При равномерной намотке реохорда сопротивления его участков пропорциональны соответствующим длинам, т. е. $R_{ac} / R_{ab} = l / L$, и тогда

$$E_{AB}(tt_0) = E_{HЭ} R_{ac} / R_K = (E_{HЭ} / R_K) (R_{ab} / L) l = kl \quad (6.36)$$

где $k = (E_{HЭ} / R_K) (R_{ab} / L) = \text{const}$.

Таким образом, измерение термоЭДС сводится к измерению длины l участка реохорда, которая проградуирована в единицах напряжения. Потенциометры, работающие по указанной схеме, имеют высокий класс точности, вплоть до 0,0005.

Схема потенциометра с переменной силой рабочего тока /б показана на рис. 6.14. Измеряемая термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$ компенсируется здесь падением напряжения $I_6 R_{ab}$ на постоянном и известном сопротивлении R_{ab} путем изменения значения тока I_6 в компенсационном контуре I с помощью реостата R_6 . Движок последнего перемещается до тех пор, пока нуль-индикатор НИ в контуре II не покажет нуль, при этом отсчитывается значение тока I_6 по шкале миллиамперметра. Ввиду того что измеряемая термоЭДС зависит от точности и стабильности показаний миллиамперметра, рассматриваемый потенциометр уступает по точности потенциометру с постоянной силой рабочего тока.

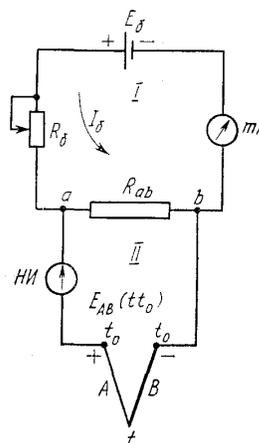


Рис. 6.14. Схема потенциометра с переменной силой рабочего тока

В то же время схема потенциометра с переменной силой рабочего тока находит применение, в частности, при построении нормирующих токовых преобразователей (см. рис. 6.16 и 6.24).

Автоматические потенциометры. Измерительная схема автоматического потенциометра (рис. 6.15) основана на схеме потенциометра с постоянной силой рабочего тока (см. рис. 6.13). Однако здесь предусматриваются два контура компенсации напряжения II и III . Контур III , содержащий в цепи резистор R_M из медной проволоки, служит для автоматического введения поправки на температуру свободных концов термоэлектрического преобразователя. Свободные концы термоэлектрического преобразователя AB с

помощью удлинительных проводов FD подводятся к резистору R_M и находятся при одной с ним температуре. Остальные резисторы измерительной схемы потенциометра выполняют из манганина.

Для питания контуров II и III в современных автоматических потенциометрах вместо батареи постоянного тока (сухого элемен-

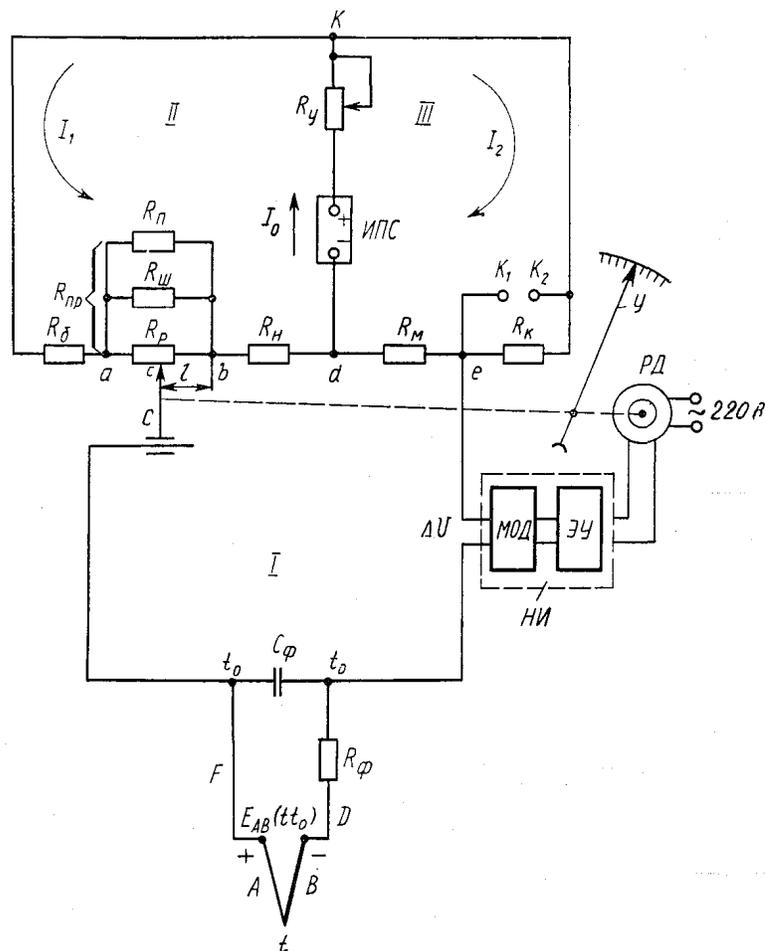


Рис. 6.15. Измерительная схема автоматического потенциометра

та) используется источник стабилизированного питания $ИПС$, в котором входное напряжение переменного тока 6,3 В выпрямляется и стабилизируется в выходное напряжение постоянного тока 5 В (погрешность стабилизации ± 5 или ± 10 мВ соответственно для классов точности 0,1 и 0,2) при нагрузке 1000 Ом и токе нагрузки

I_0 , равном 5 мА. При работе ИПС в составе потенциометра напряжение между точками d и k $U_{dk}=1019$ мВ. Благодаря использованию ИПС в автоматических потенциометрах установка рабочего тока осуществляется через несколько тысяч часов непрерывной работы, кроме того, упростилась кинематика механизма и повысилась надежность прибора.

Подключение к клеммам K_1 и K_2 нормального элемента $E_{НЭ}$ и последовательно соединенного с ним нуль-индикатора осуществляется для контроля рабочего тока I_2 лишь при поверке и градуировке потенциометра. При этом

$$U_{ke} = I_2 R_k = E_{НЭ}. \quad \text{Обычно}$$

$R_K=509,3$ Ом, тогда $I_2 = 2$ мА; R_v — резистор для установки рабочего тока I_2 ; R_{np} — значение сопротивления реохордной группы, состоящей из трех параллельно соединяемых резисторов: собственно реохорда R_p , шунта R_u и сопротивления $R_{л}$.

Такое исполнение реохордной группы связано с тем, что реохорд R_p является ответственным узлом, предназначенным для измерения. Поэтому он изготавливается из проволоки специального сплава. При необходимости изменения сопротивления на участке ab , что бывает связано с изменением диапазона измерения, изменяют общее сопротивление R_{np} этого участка за счет изменения $R_{л}$, а иногда и R_u , оставляя при этом R_p стандартным.

Резисторы R_H и R_6 служат для установления начального значения шкалы прибора и значения тока $I_I=3$ мА. В качестве нуль-индикатора НИ в автоматических потенциометрах используется электронный усилитель ЭУ, на входе которого установлен модулятор МОД для преобразования сигнала небаланса напряжения постоянного тока ΔU в переменное напряжение. Для предохранения усилителя от наводок и помех, возникающих в цепи термоэлектропреобразователя под влиянием электромагнитных полей, предусмотрен фильтр, состоящий из сопротивления R_ϕ и конденсатора C_ϕ .

Рассмотрим работу автоматического потенциометра. Пусть при некотором значении измеряемой термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$ и некотором положении движка реохорда C ток в контуре измерения II равен нулю, т. е. $E_{AB}(tt_0)$ скомпенсировано падением напряжения U_{ce} на участке $cbde$. Тогда сигнал небаланса $\Delta U = E_{AB}(tt_0) - U_{ce}$ равен нулю. При сигнале $\Delta U=0$ на выходе усилителя в соответствии с абсолютным значением и знаком небаланса формируется управляющий сигнал, при котором реверсивный двигатель РД перемещает движок реохорда C до тех пор, пока ΔU не станет равным нулю. Одновременно с движком по шкале прибора перемещается указатель У. Сведение к нулю небаланса ΔU , т. е. достижение полного равенства компенсирующего напряжения U_{ce} измеряемой термоЭДС $E_{AB}(tt_0)$, реализуется благодаря тому, что система автокомпенсации является астатической. Свойство астатичности достигается из-за наличия в системе регулирования небаланса интегрирующего или астатического звена, в качестве которого выступает здесь реверсивный двигатель.

Разберем теперь, как осуществляется автоматическое введение поправки на температуру свободных концов термоэлектротеплопреобразователя.

При некоторой температуре t рабочего спая и температуре свободных концов $t_0=0$ имеет место равенство

$$E_{AB}(tt_0) = U_{ce} = U_{cb} + U_{bd} - U_{ed}$$

Пусть при той же температуре рабочего спая t температура свободных концов изменилась: $t'_0 > t_0$. Тогда термоЭДС ТЭП уменьшится на $E_{AB}(t'_0 t_0)$ и станет равной $E_{AB}(tt'_0) = E_{AB}(tt_0) - E_{AB}(t'_0 t_0)$. Повышение температуры от t_0 до t'_0 приведет к увеличению значения сопротивления резистора от $(R_M)_{t_0}$ до $(R_M)_{t'_0}$, т. е. на $\Delta R = (R_M)_{t'_0} - (R_M)_{t_0}$. Вследствие этого падение напряжения на этом резисторе увеличится на $\Delta U_{ed} = \Delta R_M$, и тогда

$$E_{AB}(tt'_0) = E_{AB}(tt_0) - E_{AB}(t'_0 t_0) = U_{cb} + U_{bd} - (U_{ed} + \Delta U_{ed})$$

Таким образом, при неизменной температуре рабочего спая t и любой температуре свободных концов t'_0 для того, чтобы движок C не перемещался и не изменялось показание прибора, т. е. для того, чтобы небаланс ΔU равнялся нулю, необходимо обеспечить условие

$$E_{AB}(t'_0 t_0) = \Delta U_{ed} = I_2 \Delta R_M \quad (6.37)$$

Значение сопротивления медного резистора $(R_M)_{t_0}$ при $t_0=0^\circ\text{C}$ определяют из (6.37), учитывая, что входящее сюда значение ΔR_M равно $\Delta R_M = (R_M)_{t_0} a(t'_0 - t_0)$. Следовательно,

$$(R_M)_{t_0} = \frac{E_{AB}(t'_0 t_0)}{a I_2 (t'_0 - t_0)} \quad (6.38)$$

где a — температурный коэффициент электрического сопротивления меди; $I_2 = 2$ мА; t'_0 — принимают равным 50°C .

Выпускаемые промышленностью автоматические потенциометры, различаясь конструктивным исполнением, имеют практически одну и ту же типовую измерительную схему, подобную приведенной на рис. 6.15. При решении задач автоматического контроля и регулирования на практике оказывается необходимым с точки зрения увеличения точности измерения температуры конкретного объекта изменить стандартные пределы измерения на заданный диапазон. Значения сопротивления резисторов измерительной схемы для заданного диапазона можно получить из следующих соотношений. Для заданных начального t_{\min} и конечного t_{\max} значений температуры по шкале прибора для конкретного ТЭП из таблиц

определяют $E_{AB}(t_{\max} t_0)$ и $E_{AB}(t_{\min} t_0)$. Падение напряжения U_{ab} на сопротивлениях реохордной группы равно диапазону измерений прибора

$$U_{ab} = I_1 R_{ПП} = E_{AB}(t_{\max} t_0) - E_{AB}(t_{\min} t_0) \quad (6.39)$$

Отсюда определяют значение $R_{ПП}$, принимая $I_1=3$ мА. Так как $R_{ПП} = \frac{R_{\text{Э}} R_{II}}{R_{\text{Э}} + R_{II}}$ $R_{\text{Э}} = \frac{R_P R_{III}}{R_P + R_{III}}$ $R_P=130$ Ом и $R_{\text{Э}}=90$ Ом по Найденному значению $R_{ПП}$ определяют R_{II} . Значение R_H подбирают из условия

$$E_{AB}(t_{\min} t_0) = U_{be} = I_1 R_H - I_2 (R_M)_{t_0} \quad (6.40)$$

Отсюда

$$R_H = \frac{E_{AB}(t_{\min} t_0) + I_2 (R_M)_{t_0}}{I_1} \quad (6.41)$$

Значение резистора R_6 определяется из условия постоянства тока $I_1=3$ мА:

$$I_1 (R_6 + R_{ПП} + R_H) = U_{dk} = I_2 [R_k + (R_M)_{t_0}] \quad (6.42)$$

откуда

$$R_6 = \left\{ I_2 R_k - I_1 R_{ПП} - [I_1 R_H + I_2 (R_M)_{t_0}] \right\} / I_1$$

или

$$R_6 = [I_2 R_k - I_1 R_{ПП} - E_{AB}(t_{\min} t_0)] / I_1 \quad (6.43)$$

Автоматические потенциометры конструктивно, а также по дополнительно выполняемым функциям имеют ряд модификаций. Различают полногабаритные, малогабаритные и миниатюрные автоматические потенциометры с шириной диаграммной ленты 250, 160 и 100 мм. Автоматические потенциометры выпускают в виде показывающих и самопишущих, одно- и многоточечных. В них могут встраиваться регулирующие и сигнализирующие устройства, а также устройства для передачи показаний на расстояние с помощью токовых, частотных, пневматических и ферродинамических преобразователей.

В зависимости от модификации классы точности прибора равны 0,25; 0,5 и 1,0. Несмотря на различия в конструктивном исполнении приборов и в их габаритных размерах измерительная схема автоматических потенциометров практически не отличается от схемы, приведенной на рис. 6.15.

Нормирующие преобразователи термоЭДС. Для введения информации от ТЭП в ЭВМ или в систему автоматического регулирования широко применяются нормирующие измерительные токовые преобразователи. Они предназначены для преобразования сигнала ТЭП в унифицированный сигнал постоянного тока 0—5 мА. В основу работы нормирующего преобразователя положен компенсационный метод измерения термоЭДС с использованием

схемы потенциометра с переменной силой рабочего тока. Схема преобразователя приведена на рис. 6.16. Здесь I — контур измерения; II — контур компенсации. Контур I содержит корректирующий мост KM , усилитель U_1 с токовым выходом $I_{вых}$ и резистор R_{KH} . К контуру I с помощью удлинительных проводов F и D подсоединен ТЭП AB . Корректирующий мост предназначен для введения автоматической поправки на изменение температуры свободного конца ТЭП (принцип работы моста рассмотрен в § 6.5 и на рис. 6.7), а также компенсации начальной термоЭДС в преобразователях, нижний предел измерения которых не равен 0°C . К диагонали ab питания моста подведено стабилизированное напряжение постоянного тока. Резисторы R_1 , R_2 и R_3 — манганиновые, резистор R_H — из медного провода. Усилитель U_1 состоит из двух каскадов: магнитного

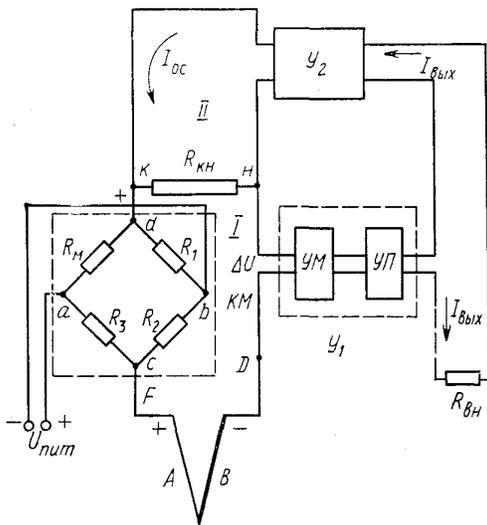


Рис. 6.16. Схема нормирующего токового преобразователя, работающего в комплекте с термоэлектрическим преобразователем

УМ, выполненного по двухтактной двухполупериодной схеме, и полупроводникового усилителя УП, работающего в режиме усиления постоянного тока. Усилитель U_1 выполняет функции нуля-индикатора.

Контур компенсации II включает в себя резистор R_{KH} и усилитель обратной связи U_2 . Этот усилитель аналогичен усилителю U_1 , но включен с глубокой отрицательной связью по выходному току усилителя. Выходной ток $I_{ос}$ усилителя U_2 является рабочим током контура II и при прохождении этого тока по сопротивлению R_{KH} на нем со стороны контура II создается компенсирующее напряжение $U_{KH} = I_{ос}R_{KH}$. Со стороны контура I к резистору R_{ab} подводится сигнал термоэлектрпреобразователя $E_{AB}(tt'_0)$, сложенный с напряжением U_{cd} , создаваемым в измерительной диагонали cd корректирующего моста KM . Это напряжение, как указывалось, равно поправке на температуру свободных концов ТЭП, т. е. $U_{cd} = E_{AB}(tt'_0)$. Таким образом, этот суммарный сигнал, равный $E_{AB}(tt_0) = E_{AB}(tt'_0) + U_{cd}$, сравнивается с напряжением U_{KH} . Небаланс, равный $\Delta U = E_{AB}(tt_0) - U_{KH}$, подается на усилитель U_1 ,

где этот сигнал постоянного тока ΔU преобразуется сперва в магнитном усилителе $УМ$ в сигнал переменного тока, затем усиливается и опять преобразуется в сигнал постоянного тока, который дополнительно усиливается в полупроводниковом усилителе $УП$ постоянного тока. Выходной сигнал усилителя $У_1$ создает ток $I_{\text{вых}}$, который поступает во внешнюю цепь $R_{\text{вн}}$ и далее через делитель — в усилитель обратной связи $У_2$. Выходной ток $I_{\text{ос}}$ усилителя $У_2$ изменяется и изменяет падение напряжения $U_{\text{КН}}$ на резисторе $R_{\text{КН}}$ до тех пор, пока небаланс ΔU не достигнет некоторой малой величины δU , называемой статической ошибкой компенсации.

Наличие статической ошибки компенсации приводит к тому, что в контуре измерения I проходит недокомпенсированный ток. При этом чем больше измеряемая термоЭДС, тем больше этот ток.

Исключить эту ошибку в устройствах, выполненных по статической автокомпенсационной схеме, принципиально невозможно, так как выходной ток преобразователя $I_{\text{вых}}$ и ток контура компенсации $I_{\text{ос}}$ определяются наличием этой ошибки и пропорциональны ей. В то же время статическая ошибка автокомпенсационной схемы может быть значительно уменьшена, если использовать усилитель с большим коэффициентом усиления.

Рассмотрим теперь математическую связь между измеряемой термоЭДС $E_{\text{AB}}(t_0)$ и выходным током преобразователя $I_{\text{вых}}$. В соответствии со сказанным выше,

$$\Delta U = E_{\text{AB}}(t_0) - U_{\text{КН}} \quad (6.44)$$

На выходах усилителей $У_1$ и $У_2$ формируются сигналы

$$I_{\text{вых}} = k_1 I_{\text{вх}} = k_1 \frac{\Delta U}{R_{\text{вх}}} \quad (6.45)$$

$$I_{\text{ос}} = k_2 I_{\text{вых}} \quad (6.46)$$

где k_1 и k_2 — коэффициенты усиления усилителей $У_1$ и $У_2$; $I_{\text{вх}} = \frac{\Delta U}{R_{\text{вх}}}$ — ток, создаваемый во входной цепи усилителя сигналом ΔU ; $R_{\text{вх}}$ — сопротивление входной цепи усилителя $У_1$.

Падение напряжения на резисторе $R_{\text{КН}}$ с учетом (6.46) составит

$$U_{\text{КН}} = I_{\text{ос}} R_{\text{КН}} = k_2 I_{\text{вых}} R_{\text{КН}} \quad (6.47)$$

Подставляя в выражение (6.44) ΔU из (6.45) и $U_{\text{КН}}$ из (6.47), находим

$$I_{\text{вых}} = k E_{\text{AB}}(t_0) \quad (6.48)$$

где $k = \frac{1}{R_{\text{вх}}/k_1 + R_{\text{КН}}k_2}$ — коэффициент преобразования нормирующего преобразователя [при $k_1 \rightarrow \infty$, $k = 1/(k_2 R_{\text{КН}})$]

Таким образом, выходной токовый сигнал нормирующего преобразователя пропорционален откорректированному по температуре свободного спая сигналу ТЭП.

В зависимости от диапазона входного сигнала нормирующие преобразователи, работающие в комплекте с ТЭП, имеют классы точности 0,6—1,5.

§ 6.7. Термопреобразователи сопротивления

Измерение температуры термопреобразователями сопротивления основано на свойстве металлов и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры. Если априорно известна зависимость между электрическим сопротивлением R_t термопреобразователя сопротивления и его температурой t [т. е. $R_t = f(t)$ — градуировочная характеристика], то, измерив R_t , можно определить значение температуры среды, в которую он погружен.

Термопреобразователи позволяют надежно измерять температуру в пределах от -260 до $+1100^\circ\text{C}$. К металлическим проводникам термопреобразователей сопротивления предъявляется ряд требований, основными из которых являются стабильность градуировочной характеристики, а также ее воспроизводимость, обеспечивающая взаимозаменяемость изготавливаемых термопреобразователей сопротивления. К числу не основных, но желательных требований относятся: линейность функции $R_t = f(t)$, по возможности высокое значение температурного коэффициента электрического сопротивления $a = \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dt}$, большое удельное сопротивление и невысокая стоимость материала.

Исследованиями установлено, что чем чище металл, тем в большей степени он отвечает указанным основным требованиям и тем больше значения отношения R_{100}/R_0 и α (где R_0 и R_{100} — электрические сопротивления металла при 0 и 100°C соответственно). Поэтому степень чистоты металла, а также наличие в нем механических напряжений, принято характеризовать значениями R_{100}/R_0 и α . При снятии механических напряжений в металле путем его отжига указанные характеристики достигают своих предельных значений для данного металла.

Изменение сопротивления материала с изменением температуры от 0 до 100°C характеризуется коэффициентом $\alpha_{0,100} = (R_{100} - R_0)/R_0 \cdot 100$. Металлы имеют положительный температурный коэффициент сопротивления. Для большинства чистых металлов он равен $4 \cdot 10^{-3} — 6 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, что составляет увеличение электрического сопротивления при повышении температуры на один градус примерно на 0,4—0,6% от сопротивления при 0°C . Для изготовления стандартизованных термопреобразователей сопротивления в настоящее время применяют платину и медь.

Платина является наилучшим материалом для термопреобразователей

сопротивления, так как легко получается в чистом виде, обладает хорошей воспроизводимостью, химически инертна в окислительной среде при высоких температурах, имеет достаточно большой температурный коэффициент сопротивления, равный $3,94 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, и высокое удельное сопротивление $0,1 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Платиновые преобразователи сопротивления используются для измерения температуры от -260 до $+1100^\circ\text{C}$, при этом для диапазона температур от -260 до $+750^\circ\text{C}$ используются платиновые проволоки диаметром $0,05$ — $0,1$ мм, а для измерения температур до 1100°C , в силу распыления платины при этих температурах, диаметр проволоки составляет около $0,5$ мм. Значение отношения R_{100}/R_0 Для применяемых платиновых проволок составляет $1,3850$ — $1,3910$.

Платиновые термопреобразователи сопротивления являются наиболее точными первичными преобразователями в диапазоне температур, где они могут быть использованы. Платиновые термопреобразователи сопротивления используются в качестве рабочих, образцовых и эталонных термометров. С помощью последних осуществляется воспроизведение международной шкалы температур в диапазоне от $-182,97$ до $630,5 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Недостатком платины является нелинейность функции $R_t = f(t)$ и, кроме того, платина — очень дорогой металл.

Медь — один из недорогих металлов, легко получаемых в чистом виде. Медные термопреобразователи сопротивлений предназначены для измерения температуры в диапазоне от -50 до $+200^\circ\text{C}$. При более высоких температурах медь активно окисляется и потому не используется. Диаметр медной проволоки обычно $0,1$ мм, а значение отношения R_{100}/R_0 составляет $1,4260$ — $1,4280$. В широком диапазоне температур зависимость сопротивления от температуры линейна и имеет вид $R_t = R_0(1 + \alpha t)$, где $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Никель и железо благодаря своим относительно высоким температурным коэффициентам электрического сопротивления и сравнительно большим сопротивлениям хотя и используются для измерения температуры в диапазоне от -50 до $+250^\circ\text{C}$, однако широко не применяются. Это связано с тем, что градуировочная характеристика их нелинейна, а главное, не стабильна и не воспроизводима, и потому термопреобразователи сопротивления, изготовленные из этих металлов, не стандартизованы.

Конструкция технических термометров с металлическим термопреобразователем сопротивления показана на рис. 6.17.

Тонкая проволока или лента 1 из платины или меди наматывается бифилярно на каркас 2 из керамики, слюды, кварца, стекла или пластмассы. Бифилярная намотка необходима для исключения индуктивного сопротивления. После намотки обычно неизолированной платиновой проволоки каркас вместе с проволокой покрывают слюдой. Длина намотанной части каркаса с платиновой проволокой 50 — 100 мм, а с медной — 40 мм. Каркас для защиты

от повреждений помещают в тонкостенную алюминиевую гильзу 3, а для улучшения теплопередачи от измеряемой среды к намотанной части каркаса между последней и защитной гильзой 3 устанавливаются упругие металлические пластинки 4 или массивный металлический вкладыш. Помимо наматываемого проволокой каркаса используются двух- и четырехканальные керамические каркасы. В каналах размещают проволочные платиновые спирали, которые фиксируются в каналах каркаса с помощью термоцемента на основе оксида алюминия и кремния.

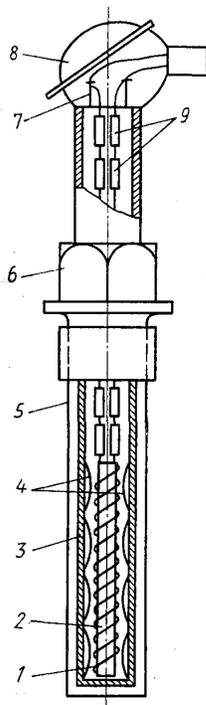


Рис. 6.17. Конструкция термометра с металлическим термопреобразователем сопротивления

При изготовлении медных термопреобразователей сопротивления применяют безындукционную бескаркасную намотку. В качестве материала используют изолированную медную проволоку диаметром 0,08 мм, покрытую фторопластовой пленкой. Гильзу 3 с ее содержимым помещают во внешний, обычно стальной, замкнутый чехол 5, который устанавливается на объекте измерения с помощью штуцера 6. На внешней стороне чехла располагается соединительная головка 8, в которой находится изоляционная колодка 7 с винтами для крепления выводных проводов, идущих от каркаса через изоляционные бусы 9. Термопреобразователи сопротивления по внешнему виду и размерам аналогичны термоэлектрическим преобразователям.

Динамическая характеристика термопреобразователей может быть представлена передаточной функцией вида $W(p) = \frac{K}{Tp+1} e^{-t_p}$, где K — коэффициент

преобразования; T и τ — постоянная времени и время запаздывания соответственно. Значения T и τ зависят от размеров защитного чехла и его материала, теплоемкости элементов, находящихся в чехле, а также от условий теплообмена. Так, при скачкообразном нагреве от 30 до 100°C в баке с водой для термопреобразователя со стальным чехлом $\tau = 8$ с и $T = 120$ с, а для латунного чехла $\tau = 3$ с и $T = 33$ с [16].

Полупроводниковые термопреобразователи сопротивления применяются для измерения температуры от -100 до 300 °С. В качестве материалов для них используются различные полупроводниковые вещества — оксиды магния, кобальта, марганца, титана, меди, кристаллы германия.

Основным преимуществом полупроводников является их большой отрицательный температурный коэффициент сопротивления. При повышении температуры полупроводников на один градус их сопротивление уменьшается на 3—5%, что делает их очень чувствительным к изменению температуры. Кроме того, они обладают значительным удельным сопротивлением и потому даже при очень малых размерах обладают значительным номинальным электрическим сопротивлением (от нескольких до сотен килоом), что позволяет не учитывать сопротивления соединительных проводов и элементов измерительной схемы. Следствием же малых размеров полупроводниковых термопреобразователей сопротивления является возможность безынерционного измерения температуры.

Зависимость сопротивления полупроводников от температуры в интервалах, не превышающих 100 °С, определяется выражением $R_T = AT^b \exp(B/T)$. В узких интервалах температур (не более 25 °С) используется более простое выражение $R_T = A \exp(B/T)$ (где R_T — сопротивление при температуре T , К; A , b , B — постоянные коэффициенты, зависящие от свойств материала полупроводника).

Недостатком полупроводниковых материалов является их значительная нелинейность и, главное, невоспроизводимость градуировочной характеристики. Поэтому полупроводниковые термопреобразователи сопротивления даже одного и того же типа имеют индивидуальные градуировки и не взаимозаменяемы.

Исключением являются германиевые термопреобразователи сопротивления, которые при технических измерениях используются для температур 30—90 К с погрешностью $\pm(0,05—0,1)$ К, а также специальный германиевый термопреобразователь, предназначенный в качестве эталонного термометра для воспроизведения температурной шкалы в интервале 4,2—13,81 К с погрешностью не более $\pm 0,001$ К.

Чувствительные элементы из полупроводников выполняются в виде цилиндров, шайб, бусинок малых размеров.

В силу указанных недостатков полупроводниковые термопреобразователи сопротивления редко используются для измерения температуры. Они находят широкое применение в системах температурной сигнализации, вследствие присущего им релейного эффекта — скачкообразного изменения сопротивления при достижении определенной температуры. Кроме того, полупроводниковые термопреобразователи сопротивления используются в качестве чувствительных элементов в различных газоаналитических автоматических приборах.

§ 6.8. Средства измерений, работающие в комплекте с термопреобразователями сопротивления

В практике технологических измерений температуры с использованием термопреобразователей сопротивления широкое применение

нашли мосты (уравновешенные и неуравновешенные), логометры и нормирующие преобразователи.

Для точных измерений температуры и метрологической аттестации термопреобразователей сопротивления, проводимых обычно в лабораторных условиях, получили применение потенциометры постоянного тока.

Уравновешенные мосты подразделяют на неавтоматические и автоматические. В них используется нулевой метод измерения, с помощью неавтоматических мостов, используемых в лабораторных условиях, измеряют сопротивление от 0,5 до 10^7 Ом, в частности производят градуировку термопреобразователей сопротивления и измеряют температуру.

Схема уравновешенного моста показана на рис. 6.18. Диагональ питания моста ab содержит источник тока, а диагональ измерения dc

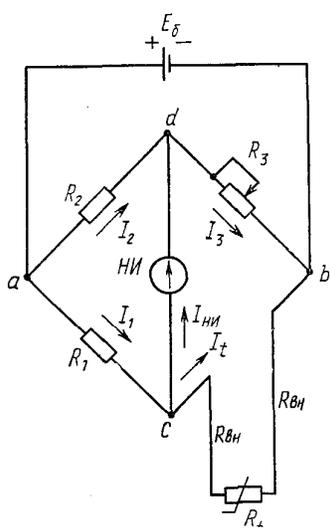


Рис. 6.18. Схема уравновешенного моста

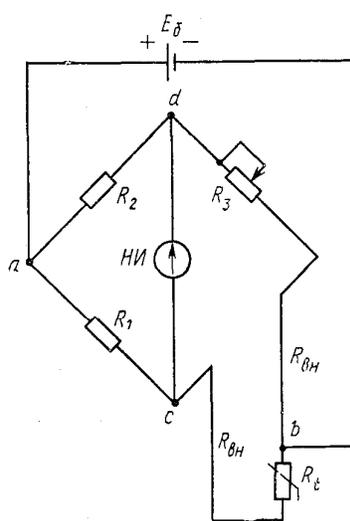


Рис. 6.19. Трехпроводная схема соединения термопреобразователя сопротивления с мостом

нуль-индикатор, в частности нуль-гальванометр. Между точками подключения разноименных диагоналей располагаются плечи моста, состоящие в данном случае из постоянных резисторов R_1 и R_2 и регулируемого R_3 , а плечо cb содержит измеряемое сопротивление R_t и два соединительных провода каждый сопротивлением R_{BH} . Если мост уравновешен, то ток $I_{НИ}$ в диагонали cd равен нулю, а токи в соответствующих плечах равны, т. е. $I_2=I_3$ и $I_1=I_t$, и как следствие, имеем $-I_2R_2=I_1R_1$ и $I_3R_3=I_t(R_t+2R_{BH})$

Разделив два последних равенства друг на друга, с учетом равенства соответствующих токов имеем

$$R_2 (R_1 + 2R_{BH}) = R_1 R_3 \quad (6.49)$$

Полученное выражение, выведенное из условия $I_{ни} = 0$, предопределяет условие равновесия моста: чтобы мост находился в равновесии, необходимо соблюсти равенство произведений сопротивлений противоположных его плеч. Это достигается путем регулирования сопротивления резистора R_3 до тех пор, пока нуль-индикатор не покажет нуль.

Таким образом, при равновесии моста имеет место равенство

$$R_1 = \frac{R_1}{R_2} R_3 - 2R_{BH} \quad (6.50)$$

Из (6.50) следует, что неизвестное сопротивление R_1 может быть определено по значению R_3 при постоянном отношении плеч R_1/R_2 , а также при неизменном значении R_{BH} . В то же время R_{BH} изменяется с изменением температуры окружающей среды, что приводит к искажению результата измерения R_1 и в тем большей степени, чем меньше значение R_1 . Указанный недостаток может быть устранен путем трехпроводного соединения термопреобразователя сопротивления с мостом (рис. 6.19). При таком соединении питающая диагональ моста доводится (точка b) до термопреобразователя сопротивления. В результате этого соединительные провода оказываются разнесенными к двум плечам моста: одно из сопротивлений R_{BH} — в плече вместе с сопротивлением R_3 , а другое R_{BH} — в смежном плече вместе с R_1 .

Тогда условие равновесия моста:

$$R_1 (R_3 + R_{BH}) = R_2 (R_1 + R_{BH}) \quad (6.51)$$

откуда

$$R_1 = (R_1 / R_2)(R_3 + R_{BH}) - R_{BH} \quad (6.52)$$

Если сделать мост симметричным ($R_1 = R_2$), то будем иметь $R_1 = R_3$, т. е. результат измерения R_1 в этом случае не зависит от сопротивления соединительных проводов R_{BH} .

Недостатком уравновешенных мостов, собранных по указанным схемам (рис. 6.18 и 6.19), является неопределенность в измерении, которую вносит переходное сопротивление контакта в регулируемом плече R_3 . Для устранения этого недостатка подвижный контакт располагают в измерительной диагонали, при этом регулируемое сопротивление оказывается размещенным в двух плечах. Таким образом, при уравновешивании моста путем перемещения контакта изменяется сопротивление сразу обоих плеч, а переходное сопротивление контакта, располагаемое теперь в измерительной диагонали, из-за отсутствия тока в момент уравновешивания не сказывается на результате измерения.

Достоинством уравновешенных мостов является независимость их от напряжения питания, минимально допустимое значение которого определяется чувствительностью нуль-индикатора.

Автоматический уравновешенный мост, собранный по схеме с переменным сопротивлением плеч и трехпроводным соединением термопреобразователя сопротивления с мостом, показан на рис. 6.20. Переменное сопротивление здесь содержит три параллельно

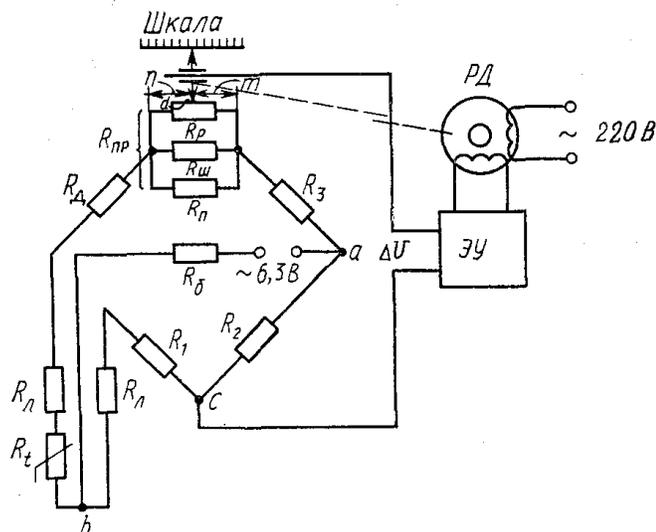


Рис. 6.20. Схема автоматического уравновешенного моста

соединенных резистора: R_p — собственно реохорд, выполняющий измерительные функции; $R_{ш}$ — шунт реохорда; R_{II} — резистор для подгонки заданного значения параллельного соединения сопротивлений всей реохордной группы; $R_{пр}$, R_1 , R_2 , R_3 — резисторы мостовой схемы; $R_д$ — добавочный резистор для подгонки тока из условия минимального самонагрева термопреобразователя сопротивления; $R_б$ — резистор балластный в цепи питания для ограничения тока; R_t — термопреобразователь сопротивления; $R_л$ — резистор для подготовки сопротивления соединительной линии; m — положение движка реохорда правее точки d в долях от $R_{пр}$; n — положение движка реохорда левее точки d в долях от $R_{пр}$.

Для получения линейной зависимости положения движка реохорда от изменения сопротивления резистора R_t последний включается в плечо, прилежащее к реохорду.

В качестве нуль-индикатора $НИ$ в автоматических мостах используется электронный усилитель $ЭУ$. Автоматические мосты питаются как переменным, так и постоянным током. В последнем случае на входе $ЭУ$ устанавливается модулятор, подобно тому, как это делается в автоматических потенциометрах. При изменении температуры изменяется сопротивление R_t и мост выходит из

равновесия, т. е. в измерительной диагонали cd появляется напряжение дебаланса ΔU , которое усиливается усилителем $\mathcal{E}U$ до значений, достаточных для вращения ротора реверсивного двигателя $RД$ в соответствующую сторону, в зависимости от знака дебаланса. Вал $PД$, связанный с движком реохорда, перемещает его до тех пор, пока дебаланс ΔU не станет равным нулю. Одновременно с движком перемещается каретка с пером и стрелкой, указывающей по шкале положение m движка или, что то же, значение измеряемой температуры. При изменении температуры от минимального до максимального значения движок перемещается из одного крайнего положения в другое (для схемы, показанной на рис. 6.20, соответственно справа налево). Пусть при температуре, соответствующей начальному значению шкалы прибора, измеряемое сопротивление R_t равно $R_{нач}$, а при изменении температуры $R_t = R_{нач} + \Delta R_t$. Условия равновесия для двух этих случаев представляются в виде

$$(R_{нач} + R_L + R_D + R_{PP})R_2 = (R_1 + R_L)R_3 \quad (6.53)$$

и

$$(R_{нач} + \Delta R_t + R_L + R_D + R_{PP} - mR_{PP})R_2 = (R_1 + R_L)(R_3 + mR_{PP}) \quad (6.54)$$

Вычитывая из второго равенства первое и решая относительно m , получим

$$m = \Delta R_t \frac{R_2}{R_{PP}(R_1 + R_L + R_2)} \quad (6.55)$$

Отсюда видно, что m — линейная функция ΔR_t . Кроме того, из последнего выражения следует, что, несмотря на трехпроводную схему соединения термопреобразователя сопротивления с мостом, показания последнего зависят от изменения сопротивления соединительных проводов. Однако эта зависимость, как показывают расчеты [3], незначительна и при изменении температуры окружающей среды до $t=40^\circ\text{C}$ изменение сопротивления проводов R_L приводит к изменению показаний прибора в пределах (0,05— 0,1)% от нормирующего значения измеряемой величины для различных диапазонов измерения. Полностью отсутствует влияние сопротивления соединительных проводов при симметричном мосте, т. е. когда $R_1 = R_t + R_D + R_{PP} - mR_{PP}$. Так как это условие может быть реализовано лишь при одной измеряемой температуре, то обычно его выполняют для температуры $t_{сред}$, соответствующей середине диапазона шкалы. При этом

$$R_1 \approx R_{сред} + R_D + R_{PP} / 2 \quad (6.56)$$

Назначение, устройство и принцип работы основных узлов автоматического моста — модулятора (при питании моста постоянным током), электронного усилителя, реверсивного двигателя, реохорда, записывающего устройства, привода диаграммы, переключателя

(в многоточечных приборах) — такие же, как и в автоматических потенциометрах.

Выпускаемые в настоящее время автоматические мосты отличаются друг от друга назначением, конструкцией, размерами, точностью измерения и другими техническими характеристиками, например мосты одноточечные и многоточечные, самопишущие и показывающие с ленточной, а также с дисковой диаграммой: полногабаритные, малогабаритные и миниатюрные с шириной диаграммной ленты соответственно 250, 160 и 100 мм. Измерительная схема всех этих мостов незначительно отличается от схемы, приведенной на рис. 5.20. Классы точности автоматических мостов равны 0,25; 0,5 и 1, а время пробега стрелки всей шкалы 1; 2,5 и 10 с. В автоматические мосты встраиваются электрические и пневматические регулирующие устройства, а также устройства сигнализации; для дистанционной передачи показаний — преобразователи пневматические, токовые, частотные и др.

Неуравновешенные мосты не требуют уравнивания тока, проходящего в его измерительной диагонали. Значение этого тока является мерой подсоединенного к мосту измеряемого сопротивления. Это основное преимущество неуравновешенных мостов.

Неуравновешенные мосты относительно редко используются для измерения температуры. Они широко применяются в различных газоанализаторах, где в качестве чувствительного элемента используются нагреваемые электрическим током металлические или чаще полупроводниковые резисторы. В неуравновешенном мосте (рис. 6.21) сопротивления трех плеч R_1 , R_2 , R_3 — постоянны, R_6 — реостат в диагонали питания, Π — переключатель, с помощью которого к четвертому плечу моста подключается измеряемое сопротивление R_t (положение Π) или контрольное сопротивление R_K (положение K). Значение тока I_d , проходящего через миллиамперметр mA , определяется

$$I_d = U_{ab} \frac{R_2 R_t - R_1 R_3}{M} \quad (6.57)$$

где $M = f(R_1, R_2, R_3, R_t)$.

Несмотря на то что M зависит также от изменяющегося сопротивления R_t , при малых изменениях его значение M можно считать постоянным. Тогда из (6.57) следует, что если напряжение в диагонали ab питания моста U_{ab} постоянно, то ток в измерительной диагонали cd линейно зависит от R_t . Для контроля постоянства значения U_{ab} переключатель из положения Π время от времени устанавливают в положение K . Если значение напряжения U_{ab} равно значению, принятому при градуировке прибора, то в положении K значение тока I_d должно быть вполне определенным и стрелка миллиамперметра должна устанавливаться на контрольном значении шкалы, отмеченном цветной линией. В противном случае указанное достигается путем изменения сопротивления реостата R_6 . В последнее время применение стабилизированных источников

питания (ИПС) вместо батарей постоянного тока исключает необходимость контрольных процедур проверки постоянства напряжения питания моста. Если в качестве измеряемого сопротивления R_t используются не полупроводниковые резисторы, то с целью исключения погрешности от влияния изменения сопротивления соединительных проводов при изменении их температуры применяют трехпроводную схему соединения R_t с мостом. Для этого точку b диагонали питания ab смещают до термопреобразователя сопротивления.

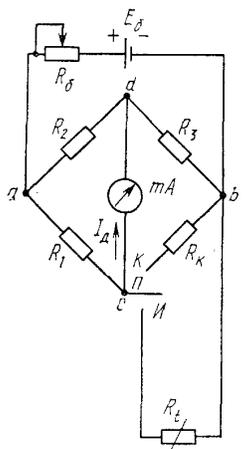


Рис. 6.21. Схема неуравновешенного моста

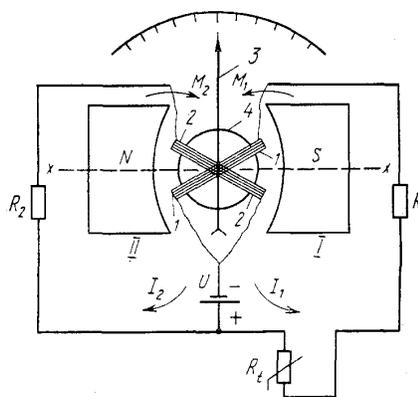


Рис. 6.22. Схема магнитоэлектрического логометра

В приборах автоматического аналитического контроля часто бывает необходимо (см. гл. 10, 11) получить информацию о разности двух сопротивлений R_{11} и R_{12} . Для этого указанные сопротивления включают в прилегающие плечи неуравновешенного моста, сигнал которого в данном случае представится в виде $I_{д} = k(R_{11} - R_{12})$, где k — коэффициент преобразования.

Логометры магнитоэлектрической системы используются в комплекте с термопреобразователями сопротивления для измерения температуры.

Логометр со скрещенными рамками (рис. 6.22) состоит из двух жестко закрепленных между собой рамок I и II , изготовленных из медных изолированных проволок сопротивлением r_1 и r_2 . На общей оси рамок насажена стрелка прибора 3 . В кольцевом воздушном зазоре между цилиндрическим сердечником из мягкой стали 4 и полюсными наконечниками вращаются активные стороны

рамки. В отличие от милливольтметра воздушный зазор между сердечником и полюсными наконечниками неравномерен и потому магнитное поле здесь распределяется неравномерно. Так, воздушный зазор на оси $x-x$ минимален и увеличивается по обе стороны от этой оси. В соответствии с этим магнитная индукция в центре максимальна и уменьшается примерно по квадратичному закону по мере удаления от центра к краям полюсных наконечников. Таким образом, магнитная индукция B , пронизывающая активные стороны рамок, является функцией угла поворота рамок φ , т. е. $B=f(\varphi)$. Токи I_1 и I_2 , проходящие соответственно в рамках 1 и 2, направлены так, что возникающие в них моменты M_1 и M_2 направлены навстречу друг другу. Значение каждого из моментов может быть выражено зависимостями $M_1 = cI_1B_1$ и $M_2 = cI_2B_2$, где c — постоянный коэффициент, зависящий от геометрии рамок; B_1 и B_2 — магнитная индукция, пронизывающая рамки 1 и 2 соответственно.

Отличием логометра от милливольтметра является то, что здесь нет противодействующих повороту рамок пружин, а уравнивание момента, действующего в одной из рамок, происходит за счет момента другой рамки. С целью исключения погрешности измерения токоподводы рамок выполняют безмоментным, например из тонкой золотой ленты, или маломомментными — из бронзовой проволоки малого диаметра.

Рассмотрим работу логометра. Пусть, например, при изменении сопротивления R_t увеличится ток I_1 что приведет к увеличению момента M_1 который начнет поворачивать подвижную систему против движения часовой стрелки. При этом окажется, что активные стороны рамки 1 будут перемещаться из поля большей магнитной напряженности в поля с меньшей напряженностью. Активные же стороны рамки 2, наоборот, из поля с меньшей магнитной напряженностью в поле с большей напряженностью. В процессе этого перемещения момент M_1 будет уменьшаться, а M_2 расти вследствие уменьшения B_1 и роста B_2 . При некотором угле поворота подвижной системы φ наступит состояние равновесия:

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{B_1}{B_2} = \gamma(j) \quad (6.58)$$

или

$$j = F \frac{I_2}{I_1} \quad (6.59)$$

Из (6.59) следует, что угол поворота подвижной системы φ , или показание логометра, определяется отношением (по-гречески логус) двух токов, что объясняет название прибора — логометр.

Выражая каждый из токов I_1 и I_2 через напряжение питания контуров U и соответствующие сопротивления, имеем

$$j = F \frac{I_2}{I_1} = F \left[\frac{U / (r_2 + R_2)}{U / (R_t + r_1 + R_1)} \right] = F \left(\frac{R_t + r_1 + R_1}{r_2 + R_2} \right) \quad (6.60)$$

В уравнении (6.60) величины r_1 , R_1 , r_2 , R_2 — постоянные, поэтому $\varphi = \psi(R_t)$, т. е. в рассматриваемом случае логометр измеряет сопротивление R_t . В виду того что логометр непосредственно измеряет отношение двух токов, генерируемых от одного источника, изменение напряжения его в определенных пределах не влияет на показания прибора. Это его преимущество. Так как рамки 1 и 2 выполнены из меди, то при изменении температуры окружающей среды сопротивления рамок изменяются, что отражается на показаниях прибора. Для уменьшения влияния температуры последовательно с сопротивлениями r_1 и r_2 рамок включаются добавочные резисторы с сопротивлениями R_1 и R_2 , выполненные из манганина. Значения этих сопротивлений много больше, чем r_1 и r_2 . Однако при этом условии вследствие уменьшения токов уменьшается чувствительность логометра. Для увеличения чувствительности логометра и одновременно уменьшения температурного коэффициента прибора используют схему симметричного неравновесного моста, в диагональ которого включаются рамки логометра (рис. 6.23). Здесь сопротивления резисторов симметричных плеч попарно равны, т. е. $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_t$ при значении R_t , соответствующем середине диапазона измерения по шкале; R_5 — сопротивление для изменения пределов измерения; R_4 — медное сопротивление для температурной компенсации; R_3 и R_y — соответственно эквивалентное и уравнивающее сопротивления, служащие для подгонки сопротивления соединительной линии. Приведенная схема позволяет для логометров класса точности 1,5 иметь дополнительную погрешность не более $\pm 0,75\%$ от значения диапазона измерения на каждые 10°C изменения температуры окружающей среды в пределах от 5 до 50°C . Подключение измеряемого сопротивления R_t к логометру можно осуществлять как по двухпроводной, так и при необходимости по трехпроводной схеме.

Логометры бывают показывающими, самопишущими, многоточечными и, кроме того, могут иметь встроенные устройства для

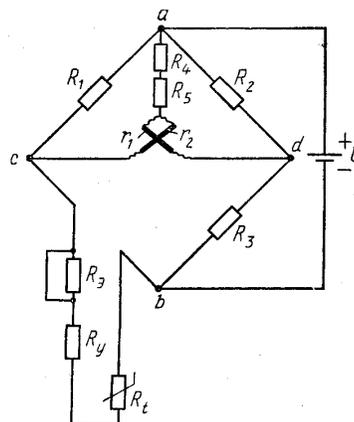


Рис. 6.23. Схема логометра, включенного в мостовую схему

сигнализации и регулирования. Классы точности промышленных логометров: 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5.

Нормирующие преобразователи. Для введения информации, получаемой с помощью термопреобразователя сопротивления, в ЭВМ или в систему автоматического регулирования используются нормирующие токовые

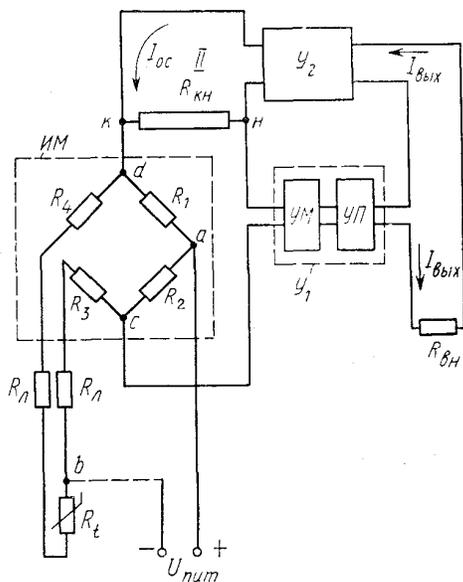


Рис. 6.24. Схема нормирующего токового преобразователя, работающего в комплекте с термопреобразователем сопротивления

преобразователи, формирующие на своем выходе сигнал постоянного тока 0—5 мА. Схема нормирующего токового преобразователя, работающего в комплекте с термопреобразователем сопротивления, показана на рис. 6.24. Этот преобразователь по схеме и принципу действия аналогичен нормирующему преобразователю, работающему в комплекте с термоэлектрическим преобразователем (см. рис. 6.16). Отличие указанных схем заключается в том, что в преобразователе (рис. 6.24) вместо корректирующего моста *КМ* (см. рис. 6.16) используется измерительный неравновесный мост *ИМ*, в одно из плеч которого по трехпроводной схеме подсоединен термопреобразователь сопротивления R_t . Остальные сопротивления выполнены из манганина. Сопротивления $R_{л}$ служат для подгонки сопротивления соединительных проводов к номинальному значению. К диагонали питания моста *ab* подведено стабилизированное напряжение постоянного тока. Выходной ток преобразователя $I_{вых}$ пропорционален напряжению U_{cd} в измерительной диагонали моста, и соотношение между ними может быть представлено в соответствии с (6.48):

$$I_{вых} = kU_{cd} \quad (6.61)$$

Так как $U_{cd} = k_M R_t$, где k_M — коэффициент преобразования моста, то

$$I_{вых} = kk_M R_t \quad (6.62)$$

Таким образом, токовый сигнал нормирующего преобразователя пропорционален сопротивлению термопреобразователя сопротивления. Классы точности рассматриваемого преобразователя 0,6-1,5.

§ 6.9. Пирометры излучения

Теоретические основы. Все физические тела, температура которых превышает абсолютный нуль, испускают тепловые лучи. Средства измерения, определяющие температуру тел по их тепловому излучению, называют пирометрами излучения или просто пирометрами.

Тепловое излучение представляет собой электромагнитное излучение, испускаемое веществом за счет его внутренней энергии (в отличие, например, от люминесценции, которая возбуждается внешними источниками энергии).

Ввиду того что интенсивность теплового излучения резко убывает с уменьшением температуры тел, пирометры используются в основном для измерения температуры от 300 до 6000 °С и выше. Для измерения температур выше 3000 °С методы пирометрии являются практически единственными, так как они бесконтактны, т. е. не требуют непосредственного контакта датчика прибора с объектом измерения. Теоретически верхний предел измерения температуры пирометрами излучения неограничен.

Следует также отметить, что бесконтактные методы измерения обладают тем положительным свойством, что при использовании их не искажается температурное поле объекта измерения. В то же время для тех интервалов температур, где могут применяться и контактные методы, последним отдается предпочтение из-за их более высокой точности.

Большинство твердых и жидких тел имеет сплошной спектр излучения, т. е. излучает волны всех длин λ , в диапазоне от 0 до ∞ . Видимое глазом человека излучение, называемое светом, охватывает диапазон длин волн 0,40—0,75 мкм. Невидимые лучи схватывают инфракрасный участок спектра, т. е. диапазон от $\lambda = 0,75$ до $\lambda=400$ мкм, за которым следует постепенный переход в радиоволновой диапазон. Лучи с $\lambda < 0,40$ мкм также невидимы и относятся к ультрафиолетовому диапазону, за которым следуют рентгеновские и гамма-лучи.

В пирометрах излучения используются в основном лучи видимого и инфракрасного диапазонов. Измерение температуры тел по их тепловому излучению основывается на закономерностях, полученных для абсолютно черного тела. Если на внешнюю поверхность тела падает поток лучистой энергии Φ (энергия, отнесенная к единице времени), то он частично поглощается $\Phi_{\text{п}}$, отражается $\Phi_{\text{от}}$ и пропускается $\Phi_{\text{пр}}$. Соотношение между этими потоками зависит от свойств тела и, в частности, от состояния его поверхности (степень шероховатости, цвет, температура). Если тело поглощает весь падающий на него лучистый поток, то коэффициент поглощения его $\alpha = \Phi_{\text{п}}/\Phi = 1$ и такое тело называют абсолютно черным.

Реальные тела не являются абсолютно черными и лишь некоторые из них по оптическим свойствам близки к ним, например

нефтяная сажа, платиновая чернь, черный бархат в области видимого света имеют коэффициенты поглощения, мало отличающиеся от единицы.

Внешняя поверхность не только поглощает, но и испускает собственное излучение, зависящее от температуры.

В качестве величин, характеризующих тепловое излучение тел, в пирометрии используется *спектральная энергетическая светимость* (интенсивность монохроматического излучения, или излучательность) E_{λ}^* *полная энергетическая светимость* (интегральная излучательность) E^* , а также *спектральная энергетическая яркость* B_{λ}^* (индекс * относится к абсолютно черному телу):

$$E_{\lambda}^* = \frac{d\Phi_{\text{изл}}}{d\lambda} \quad (6.63)$$

где E_{λ}^* — спектральная энергетическая светимость — поток испускаемого излучения $\Phi_{\text{изл}}$ с единицы поверхности при температуре T в единичном интервале длин волн $d\lambda$ (от λ до $\lambda + d\lambda$), Вт/м³;

$$E^* = \int_0^{\infty} E_{\lambda}^* d\lambda \quad (6.64)$$

здесь E^* — интегральная излучательность — полная энергия излучения единицы поверхности тела при температуре T в единицу времени для всех длин волн от $\lambda = \infty$ до $\lambda = 0$, Вт/м².

$$B_{\lambda}^* = \frac{dE_{\lambda}^*}{d\omega} \quad (6.65)$$

где B_{λ}^* — спектральная энергетическая яркость, представляющая собой спектральную энергетическую светимость, отнесенную к единице телесного угла $d\omega$, Вт/(ср-м³).

При измерении температуры яркостными визуальными пирометрами спектральная энергетическая яркость является основной величиной, воспринимаемой глазом человека. Она прямо пропорциональна спектральной энергетической светимости, т. е.

$$B_{\lambda}^* = k_{\lambda} E_{\lambda}^* \quad (6.66)$$

где k_{λ} — постоянный коэффициент, равный $1/\pi$.

В соответствии с законом Кирхгофа излучательная способность тел пропорциональна их коэффициентам поглощения. Так как коэффициент поглощения а абсолютно черного тела равен единице, то оно обладает

максимальной излучательной способностью. Реальные тела при одинаковой температуре имеют различную излучательную способность, оценку которой производят по отношению к излучательной способности абсолютно черного тела:

$$e_{\lambda} = E_{\lambda} / E_{\lambda}^* = B_{\lambda} / B_{\lambda}^* \quad (6.67)$$

$$e = E / E^* \quad (6.68)$$

где e_{λ} — коэффициент спектрального излучения (степень черноты монохроматического излучения), являющийся функцией длины

волны λ и температуры T ; ϵ — коэффициент полного излучения (степень черноты полного излучения).

Согласно закону Кирхгофа для всех реальных тел

$$\epsilon = \alpha \text{ и } \epsilon_\lambda = \alpha_\lambda,$$

где α и α_λ — коэффициенты поглощения соответственно полный и монохроматический.

Тело, у которого ϵ_λ не зависит от температуры и длины волны, называют серым. Реальные тела могут быть приняты как серые только в ограниченном интервале длин волн $\Delta\lambda$. Зависимость между спектральной энергетической светимостью абсолютно черного тела E_λ^* его температурой T и длиной волны λ для любых значений λ и T устанавливается *законом Планка*:

$$E_\lambda^* = c_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad (6.69)$$

где c_1 и c_2 — константы ($c_1 = 3,7415 \cdot 10^{16}$ Вт·м², $c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ м·К).

При значениях произведения $\lambda T < 2 \cdot 10^{-3}$ м·К формула Планка может быть с достаточной точностью (погрешность не более 0,1%) заменена формулой Вина:

$$E_\lambda^* = c_1 \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right) \quad (6.70)$$

На рис. 6.25 приведено семейство кривых E_λ^* , построенных по формуле Планка. Из рассмотрения кривых следует, что для абсолютно черного тела при выбранной длине волны с повышением температуры резко возрастает спектральная энергетическая светимость E_λ^* или спектральная яркость $B_\lambda^* = k_1 E_\lambda^*$. Так, для длины волны $\lambda = 0,65$ мкм при изменении температуры от 1000 до 2000 К, т. е. в 2 раза, яркость возрастает примерно в 2^{15} — 2^{17} раз.

Указанный факт устанавливает возможность измерения температуры тела по его спектральной яркости с высокой чувствительностью.

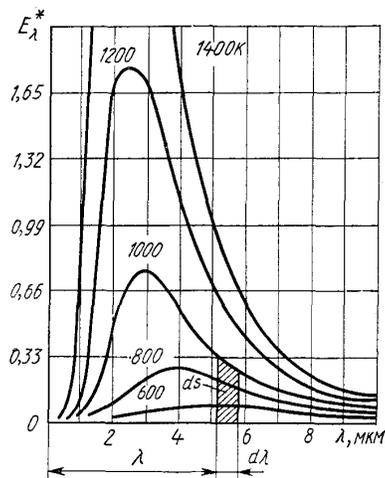


Рис. 6.25. Зависимость спектральной энергетической яркости абсолютно черного тела от длины волны

Для реальных тел, учитывая (6.66) и (6.67) и используя (6.70), спектральную энергетическую яркость B_λ представляют в виде

$$e_\lambda = E_\lambda / E_\lambda^* = B_\lambda / B_\lambda^* \quad (6.71)$$

Отсюда следует, что если реальные тела имеют одну и ту же температуру, то из-за различия ел измеренные значения B_λ , будут различаться, что не позволяет иметь единую шкалу прибора, отградуированную в значениях истинной температуры различных объектов. В этой связи шкалу пирометра приходится градуировать по излучению черного тела. Так как излучательная способность реальных тел меньше, чем черных тел, то показания пирометра будут соответствовать не действительной температуре реального тела, а дают условную температуру или, в данном случае, так называемую яркостную температуру. Пирометры, измеряющие яркостную температуру по спектральной яркости в видимой части спектра, называют *оптическими* и *фотоэлектрическими*.

Для получения соотношения между истинным значением температуры реального тела и яркостной температурой введем определение последней. *Яркостной температурой T_λ реального тела* называют такую температуру абсолютно черного тела, при которой его спектральная яркость B_{λ, T_λ}^* равна спектральной яркости реального тела B_λ при его действительной температуре T . В соответствии с этим

$$B_{\lambda, T_\lambda}^* = B_\lambda = e_\lambda B_\lambda^* \quad (6.72)$$

Учитывая (6.71), имеем

$$k_1 c_1 I^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T_\lambda}\right) = e_\lambda k_1 c_1 I^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right) \quad (6.73)$$

Преобразуя это выражение, получим

$$\frac{1}{T_\lambda} - \frac{1}{T} = \frac{1}{c_2} \ln \frac{1}{e_\lambda} \quad (6.74)$$

Из выражения (6.74) следует, что яркостная температура T_λ всегда меньше действительной температуры T , так как $e_\lambda < 1$. Чем меньше ел, тем больше разность $T - T_\lambda$, которая может достигать нескольких сотен градусов при малых значениях ел. Возвращаясь к рассмотрению кривых, приведенных на рис. 6.25, можно заметить, что значение длины волны λ_{max} соответствующей максимуму каждой из кривых распределения спектральной энергетической светимости, уменьшается с повышением абсолютной температуры черного тела. Соотношение между λ_{max} и T имеет вид $\lambda_{max} T = \text{const} = 2897$ и называется *законом смещения Вина*. Наблюдаемое в видимой части спектра излучения изменение цвета накаливаемых тел при повышении их температуры объясняется законом смещения Вина и связано с перераспределением энергии излучения. Исходя из этого, методы измерения температуры тел,

основанные на изменении распределения энергии внутри данного участка спектра излучения, называют цветовыми.

Из закона Вина и Планка следует, что отношение энергетических яркостей, соответствующих двум различной длины волнам I_1 и I_2 , Для черного тела будет зависеть от температуры, т. е. $B_{I_1}^*/B_{I_2}^* = f(T)$. Причем эта зависимость существенна и однозначна. Так, для видимой части спектра при $\lambda_1 = 0,66$ мкм и $\lambda_2 = 0,47$ мкм изменение температуры черного тела от 1200 до 3200 К. изменяет отношение $B_{I_1}^*/B_{I_2}^*$ от 279 до 2,8 примерно по гиперболическому закону.

Приборы, измеряющие температуру по значению отношения энергетических яркостей в двух спектральных интервалах, называют *цветовыми пирометрами* или *пирометрами спектрального отношения*.

Для реальных физических тел отношение спектральных яркостей отличается от подобного отношения для черного тела при той же температуре. Это связано с тем, что коэффициенты черноты e_{I_1} и e_{I_2} могут быть различными. Следовательно, цветовой пирометр, отградуированный по излучению черного тела, покажет при измерении температуры реального тела не действительную его температуру, а условную. Эту условную температуру в данном случае называют цветовой температурой. *Цветовой температурой T_c реального тела*, имеющего истинную температуру T , называется такая температура черного тела, при которой отношение его спектральных энергетических яркостей $B_{I_1}^*/B_{I_2}^*$ при длинах волн I_1 и I_2 равно отношению спектральных энергетических яркостей реального тела B_{I_1}/B_{I_2} при тех же длинах волн, т. е.

$$B_{I_1}^*/B_{I_2}^* = B_{I_1}/B_{I_2} = e_{I_1} B_{I_1}^*/(e_{I_2} B_{I_2}^*) \quad (6.75)$$

Из этого равенства с учетом (6.71) получим

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_c} = \frac{\ln(e_{I_1}/e_{I_2})}{c_2(1/I_1 - 1/I_2)} \quad (6.76)$$

Формула (6.76) позволяет вычислить истинную температуру реального тела по измеренному значению его цветовой температуры T_c , если известно отношение спектральных коэффициентов излучения e_{I_1} и e_{I_2} . Для серых тел, у которых в данном участке спектра $e_{I_1} = e_{I_2}$ правая часть формулы (6.76) обращается в нуль и поэтому цветовой температурой T_c тела будет равна его истинной температуре T .

Многие реальные тела, такие, как керамика, оксиды металлов, огнеупорные изделия, графит и др., являются практически серыми. В этой связи преимущества цветового метода измерения очевидны, так как цветовой температурой многих твердых и жидких тел значительно меньше отличается от истинной температуры, чем яркостная или радиационная.

Необходимо заметить, что для определения соотношений между цветовой и истинной, а также между яркостной и истинной температурами выражения для спектральной энергетической яркости определялось по уравнению Вина. Это справедливо в пределах применимости этого уравнения. При выходе за пределы использования уравнения Вина необходимо значение спектральных яркостей получать по формуле Планка. Для измерения температуры тел по их излучению можно использовать не только излучение определенной длины, но и суммарное излучение на всех длинах волн. Интегральная излучательность E^* в соответствии с (6.64) может быть получена интегрированием уравнения Планка, т. е.

$$E^* = \int_0^{\infty} c_1 I^{-5} (e^{\frac{c_2}{IT}} - 1)^{-1} dI \quad (6.77)$$

В результате интегрирования получаем

$$E^* = s_0 T^4 \quad (6.78)$$

где s_0 — постоянная, равная $5,6696 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴).

Зависимость (6.78) выражает закон *Стефана — Больцмана*, который устанавливает тот факт, что полная мощность излучения абсолютно черного тела E^* пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры T .

Приборы, измеряющие температуру тела по их интегральной излучательности, называют *радиационными пирометрами* или *пирометрами полного излучения*. Если чувствительный элемент радиационного пирометра воспринимает интегральную излучательность не во всем диапазоне длин волн от 0 до ∞, а в некотором ограниченном интервале длин волн от I_1 до I_2 , то такой пирометр называют *пирометром частичного излучения*.

С учетом выражений (6.68) и (6.78) для реального тела интегральная излучательность

$$E = eE^* = es_0 T^4 \quad (6.79)$$

Так как $e < 1$, то $E < E^*$.

Значения коэффициента полного излучения e для различных реальных тел различны и зависят от температуры тела. В этой связи шкалы радиационных пирометров градуируются по черному излучателю, а при измерении температуры реальных тел ввиду того, что $E < E^*$, радиационный пирометр дает заниженные показания, соответствующие некоторой условной температуре, называемой радиационной температурой тела.

Радиационной температурой T_p реального тела, имеющего истинную температуру T , называют такую температуру черного тела, при которой его интегральная излучательность E^* равна интегральной излучательности реального тела E . В соответствии с этим определением, с учетом выражения (6.68), имеем

$$E_{T_p}^* = E = eE^* \quad (6.80)$$

Принимая во внимание формулу (6.78), получим

$$s_0 T_p^4 = e s_0 T^4 \quad (6.81)$$

откуда

$$T = T_p \sqrt[4]{1/e} \quad (6.82)$$

Из соотношения (6.82) следует, что истинная температура реального тела может быть определена путем измерения его радиационной температуры T_p при известном значении коэффициента e . Если $e < 1$, то $T_p < T$ и разность $T - T_p$ может достигать нескольких сотен градусов при малых значениях e .

Средства измерений температуры тел по их тепловому излучению. Для измерения яркостной температуры тел используются оптические (квазимонохроматические) визуальные пирометры, а также фотоэлектрические пирометры.

Оптические пирометры широко применяются в лабораторных и производственных условиях для измерения температур выше 800°C . Принцип действия оптических пирометров основан на сравнении спектральной яркости тела со спектральной яркостью градуированного источника излучения. В качестве чувствительного элемента, определяющего совпадение спектральных яркостей в визуальных оптических пирометрах, служит глаз человека. Наиболее распространенным является оптический пирометр с исчезающей нитью, схе-

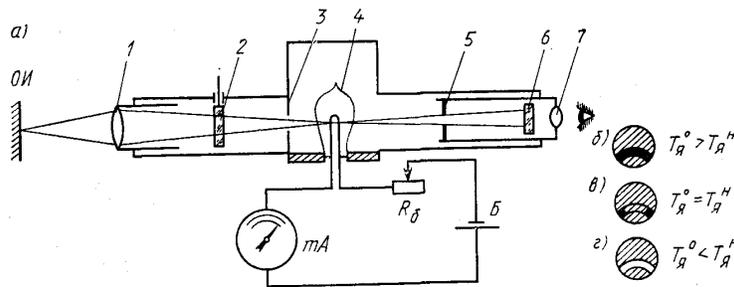


Рис. 6.26. Схема визуального оптического пирометра

ма которого приведена на рис. 6.26, а. Для измерения температуры объектив 1 прибора направляется на объект измерения $OИ$ так, чтобы наблюдатель на его фоне увидел в окуляре 7 нить оптической лампы 4.

Сравнение спектральных яркостей объекта измерения и нити лампы 4 осуществляются обычно при длине волны равной $0,65 \text{ мкм}$, для чего перед окуляром установлен красный светофильтр 6. Выбор красного светофильтра обусловлен тем, что глаз человека воспринимает через этот фильтр только часть спектра его пропускания,

приближающуюся к монохроматическому лучу. Кроме того, применение красного светофильтра позволяет снизить нижний предел измерения пирометра. Диафрагмы (входная 3 и выходная 5) ограничивают входной и выходной углы пирометра, оптимальные значения которых позволяют обеспечить независимость показаний прибора от изменения расстояния между объектом измерения и объективом.

Наблюдая за изображением нити лампы на фоне объекта измерения [светлый фон — темная нить (рис. 6.26, б); темный фон — светлая нить (рис. 6.26, г)], с помощью реостата R_6 меняют силу тока, идущего от батареи B к нити лампы, до тех пор, пока яркость нити не станет равной видимой яркости объекта измерения. При достижении указанного равенства нить «исчезает» на фоне изображения объекта измерения (рис. 6.26, 0). В этот момент по шкале миллиамперметра mA , предварительно отградуированного в значениях яркостной температуры нити лампы $T_{я}^0$, определяют яркостную температуру объекта $T_{я}^0$. По измеренной яркостной температуре при известном e_1 в соответствии с выражением (6.74) рассчитывают истинную температуру объекта.

Нить оптической лампы выполнена из вольфрама, поэтому во избежание ее возгонки при температурах выше $1400^{\circ}C$, для измерения более высоких температур перед лампой включается ослабляющий или поглощающий светофильтр 2. Благодаря этому светофильтру уменьшается видимая яркость объекта измерения в кратное число раз, что позволяет не перекаливать нить и сохранить стабильность градуировки пирометра. Оптическую плотность поглощающего стекла выбирают с таким расчетом, чтобы при температурах объекта, превосходящих $1400^{\circ}C$, нить накала нагревалась не выше $1400^{\circ}C$. Поэтому обычно в оптических пирометрах имеется две шкалы, одной из которых пользуются при невведенном поглощающем светофильтре, например от 800 до $1200^{\circ}C$, а второй — при введенном светофильтре от 1200 до $2000^{\circ}C$.

Существующие в настоящее время оптические пирометры предназначены для измерения температур в интервале от 800 до $6000^{\circ}C$ и имеют различные модификации с различными пределами измерения. Класс точности оптических пирометров 1,5–4,0.

Фотоэлектрические пирометры. В отличие от оптических визуальных пирометров фотоэлектрические пирометры являются автоматическими. Чувствительными элементами, воспринимающими лучистую энергию, в этих приборах могут служить фотоэлементы, фотоумножители, фотосопротивления и фотодиоды. Измерение температуры фотоэлектрическими пирометрами, как и оптическими визуальными, основано на зависимости спектральной яркости тела от его температуры.

Фотоэлектрические пирометры по принципу действия бывают двух типов. К первому типу относятся приборы, в которых воспринимаемая прибором лучистая энергия, попадая на чувствительный элемент, изменяет его параметры (фототок, сопротивление). В приборах

второго типа измерение лучистой энергии осуществляется компенсационным методом, здесь чувствительный элемент работает в режиме нуль-индикатора, сравнивая интенсивности излучения от измеряемого тела и стабильного источника излучения — миниатюрной лампочки накаливания.

Фотоэлектрические пирометры второго типа более сложны, но более точны, так как их показания не зависят от характеристик чувствительного элемента и электронной схемы. Рассмотрим фотоэлектрический пирометр, работающий по компенсационному методу, схема которого приведена на рис. 6.27. Тубус прибора визируется на объект *ОИ* так, чтобы световой поток попадал на объектив 2, проходит через диафрагму 3 и верхнее отверстие диафрагмы 5, пронизывает красный светофильтр 6, а затем воспринимается фотоэлементом 7. Через нижнее отверстие диафрагмы 5 к фотоэлементу попадает световой поток от регулируемого источника света 1, питаемого током от силового блока 9. Последний управляется электронным усилителем 8, входом которого является фототок от фотоэлемента 7. Световые потоки попадают на фотоэлемент 7 в противофазе. Это осуществляется тем, что перед отверстиями диафрагмы установлена вибрирующая заслонка 4, поочередно перекрывающая эти отверстия. Профили этой заслонки и отверстий диафрагмы 5 выполнены так, что каждый из световых потоков, попадая на фотоэлемент, создает противоположный по фазе синусоидальный ток.

Таким образом, при одинаковых интенсивностях световых потоков от объекта измерения и лампы 1, или, точнее, одинаковых спектральных яркостях, воздействующих в противофазе, на фотоэлементе генерируется постоянный ток.

Если интенсивности световых потоков, поступающих на фотоэлемент, окажутся не равными друг другу (например, при изменении температуры объекта), то в цепи фотоэлемента появляется переменная составляющая фототока, которая усиливается электронным усилителем 8 и поступает на фазочувствительный каскад силового блока 9. В результате изменяется ток накала лампы / до тех пор, пока на фотоэлементе не уравниются световые потоки от объекта измерения и лампы. Строго говоря, световой поток от лампы никогда точно не равен потоку от объекта измерения из-за того, что уравнивание световых потоков выполнено по пропорциональной

автокомпенсационной схеме. Однако благодаря большому коэффициенту усиления системы статическая ошибка уравнивания мала.

Таким образом, ток лампы, однозначно связанный с ее спектральной яркостью, может служить мерой яркостной температуры объекта. Следовательно, измеряя автоматическим потенциометром падение напряжения, вызванное током лампы на резисторе I_0 с сопротивлением R , шкалу потенциометра градуируют в значениях яркостной температуры.

В фотоэлектрических пирометрах с нижним пределом измерения 800°C и выше применяют вакуумные сурьмяно-цезиевые фотоэлементы, имеющие спектральную характеристику, схожую со спектральной характеристикой глаза человека. Поэтому в фотоэлектрических пирометрах указанный фотоэлемент в сочетании с красным светофильтром позволяет (для диапазона измерений $800\text{—}4000^\circ\text{C}$) получать показания прибора, совпадающие с показаниями оптических визуальных пирометров. Фотоэлектрические пирометры имеют основную погрешность $\pm 1\%$ при верхнем пределе измерений до 2000°C и $\pm 1,5\%$ при верхнем пределе более 2000°C .

Использование в фотоэлектрических пирометрах других чувствительных к световому потоку элементов позволяет снизить нижний предел измерения, в частности при использовании в качестве приемника излучения сернисто-свинцового фотосопротивления нижний предел измерения пирометра равен 200°C .

Пирометры спектрального отношения, или цветные пирометры, как указывалось, предназначены для определения цветовой температуры путем измерения отношения спектральных энергетических яркостей, соответствующих двум длинам волн.

Подставляя в уравнение (6.75) вместо B_{I_1} , и B_{I_2} их выражения через формулу (6.71) и произведя некоторые преобразования, получим

$$\ln \frac{B_{I_1}}{B_{I_2}} = \frac{1}{T_{II}} \left(\frac{1}{I_1} - \frac{1}{I_2} \right) c_2 + 5 \ln \frac{I_2}{I_1} \quad (6.83)$$

Отсюда следует, что обратное значение цветовой температуры измеряемого объекта прямо пропорционально логарифму отношения B_{I_1}/B_{I_2} .

Существует несколько модификаций двух- и одноканальных цветных пирометров. В двухканальных пирометрах измерительные сигналы, соответствующие каждой длине волны излучения, передаются одновременно по двум независимым каналам, и из соотношения величин данных сигналов определяется мгновенная цветовая температура объекта.

В пирометрах с одноканальной схемой измерения два различных монохроматических потока с помощью оптического коммутатора поочередно подаются на один фотоэлектрический приемник.

Двухканальные пирометры используются в основном в лабораторной практике, когда требуется измерять температуру с большой скоростью.

Одноканальные пирометры нашли широкое применение благодаря большой стабильности их работы, так как в этих пирометрах одновременно с изменением характеристик схемы (изменение чувствительности фотоприемника, напряжения питания и др.) происходит изменение значений обоих сигналов, соответствующих различным длинам волн, и поэтому показание пирометра не изменяется.

Рассмотрим одну из распространенных схем (рис. 6.28) одно-канального цветового пирометра с использованием электронной счетной схемы. Конструктивно прибор выполнен в виде блоков: телескопа T и преобразователя сигналов $БП$. Излучение от объекта 1 через оптическую систему 2 и обтюратор 3 попадает на фотоэлемент 4 . Обтюратор представляет собой диск с двумя отверстиями, в одно из которых

вставлен красный светофильтр, а в другое — синий. При вращении обтюратора синхронным двигателем 13 на фотоэлемент попеременно попадает излучение красной и синей спектральных яркостей, в результате чего в цепи фотоэлемента формируются импульсы фототока, пропорциональные соответствующим спектральным яркостям. Импульсы фототока, усиленные в предварительном усилителе 5 , в виде импульсов напряжения, имеющих трапецеидальную форму, преобразуются в короткие острые импульсы U_1 и U_2 с помощью дифференцирующей цепочки 6 и пик-детектора 7 . Эти импульсы подаются на логарифмирующее звено 8 , содержащее цепочку RC . Конденсатор, заряженный импульсами напряжений U_1 и U_2 , разряжается затем на сопротивление, и изменение напряжения U на нем идет по экспоненциальному закону с постоянной времени $T=RC$, т. е.

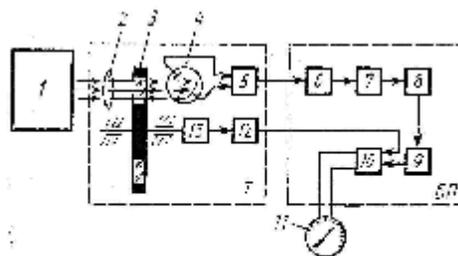


Рис. 6.28. Схема цветового фотоэлектрического пирометра

$$U = U_1 e^{-\frac{t}{T}} \text{ и } U = U_2 e^{-\frac{t}{T}} \quad (6.84)$$

Эти выражения можно представить в виде

$$t = T \ln(U_1/U) \text{ и } t = T \ln(U_2/U) \quad (6.85)$$

Далее установлен амплитудный ограничитель напряжения 9 , пропускающий сигналы постоянного уровня U_0 с момента возникновения импульса до тех пор, пока напряжение U не снизится до

уровня ограничения f/o. Таким образом, на выходе ограничителя 9 формируются прямоугольные импульсы, длительности которых t_1 и t_2 оказываются пропорциональными логарифмам U_1 и U_2 , т. е.

$$t_1 = T \ln(U_1/U_0) \text{ и } t_2 = T \ln(U_2/U_0) \quad (6.86)$$

где U_1 и U_2 — напряжения, пропорциональные соответственно красной и синей спектральным яркостям.

С выхода ограничителя прямоугольные импульсы, соответствующие красному и синему световым потокам, с помощью синхронного переключателя I_2 , установленного на валу диска обтюратора, подаются в противофазе на фильтр I_0 . Постоянная составляющая тока I_{cp} на выходе фильтра, определяемая разностью длительности прямоугольных импульсов, измеряется автоматическим потенциометром II :

$$I_{cp} = I_0 \frac{t_1 - t_2}{q} \quad (6.87)$$

где I_0 — амплитуда тока на выходе ограничителя; q — период вращения обтюратора.

Подставляя в (6.87) значения t_1 и t_2 из (6.86), получим

$$I_{cp} = \frac{I_0 T}{q} \ln \frac{U_1}{U_2}$$

или

$$I_{cp} = A \ln \frac{B_{I_1}}{B_{I_2}} \quad (6.88)$$

где A — постоянный коэффициент.

Таким образом, показания цветового пирометра однозначно связаны с логарифмом отношения спектральных яркостей и, следовательно, с цветовой температурой объекта.

Диапазон измерений описываемого пирометра 1400—2800°C. Он подразделяется на пять-шесть поддиапазонов по 250—300°C. Меняя диск со светофильтрами, переходят от одного диапазона измерений к другому. Класс точности пирометра 1.

Радиационные пирометры, или пирометры полного излучения, — это приборы, воспринимающие излучение от объекта во всем спектральном диапазоне. Строго говоря, приемники излучения имеют ограниченный рабочий диапазон длин волн и поэтому в пирометре используется не полный спектр излучения, а лишь определенная полоса спектра. И все же принято считать, что пирометр является радиационным, если в нем используется не менее 90% излучения от объекта измерения. Радиационные пирометры имеют самый широкий диапазон измерения, он лежит в интервале 50—2000°C и выше. Для радиационных пирометров могут быть использованы только тепловые приемники излучения — термоэлектрические преобразователи или термопреобразователи сопротивления.

Измерение температуры радиационными пирометрами основано на улавливании теплового излучения и концентрации его на термочувствительном элементе с помощью собирающей линзы (рефракторные приборы) или вогнутых зеркал (рефлекторные приборы). На рис. 6.29 приведена схема радиационного пирометра рефракторного типа.

Излучение от объекта 1 концентрируется линзой 2 объектива через диафрагму 3 на рабочих концах термобатареи 4, собранной из ряда последовательно соединенных термоэлектрических преобразователей.

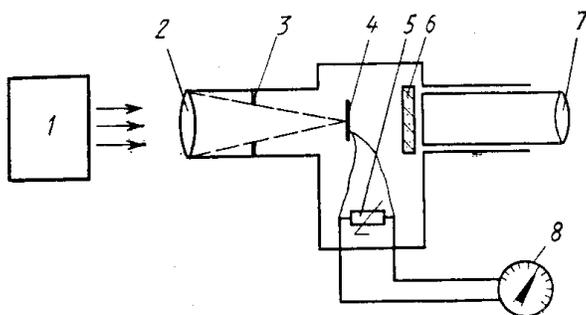


Рис. 6.29. Схема радиационного пирометра рефракторного типа

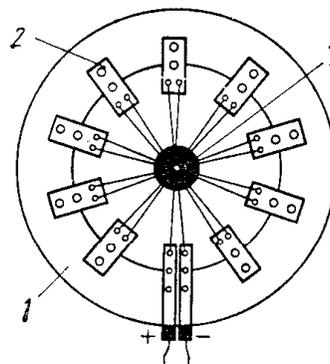


Рис. 6.30. Схема звездообразной термобатареи

Фокусировка телескопа пирометра на объект измерения производится окуляром 7. При высокой температуре объекта для защиты глаза перед окуляром в поле зрения вводят красное стекло 6.

В качестве вторичного прибора используют милливольтметр или потенциометр, шкалы которых градуируются в значениях радиационной температуры.

Существуют различные конструкции термобатарей. На рис. 6.30 приведена звездообразная термобатарея, выполненная из десяти последовательно соединенных термоэлектрических преобразователей, в качестве которых обычно используются хромель-копелевые термоэлектроды диаметром 60—70 мкм. Плоские рабочие концы 3 преобразователей, зачерненные платиновой чернью, образуют венчик. Свободные концы термоэлектрических преобразователей закреплены с помощью металлических пластин 2 на слюдяном кольце 1. Температура свободных концов преобразователя при градуировке равна $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Для компенсации влияния изменения температуры свободных концов термобатареи параллельно последней подсоединяют катушку 5 (см. рис. 6.29) из медной или никелевой проволоки. Этот метод компенсации заключается в том, что, например, при увеличении температуры свободных концов термоЭДС термобатареи уменьшается, а сопротивление меди увеличивается и ток,

ответвляющийся в измерительный прибор 8, сохраняется практически постоянным.

Классы точности радиационных пирометров 1,0 и 1,5. Постоянная времени этих приборов составляет 0,3—1,5 с. При установке телескопа между ним и объектом не должно быть паров влаги, дыма, пыли и т. д., так как последние поглощают лучистую энергию, что может привести к дополнительной погрешности измерения. Кроме того, следует оберегать корпус прибора от нагрева выше 100—200°С. Если это невозможно, то телескоп устанавливают в кожух с водяным охлаждением.

ГЛАВА 7 ИЗМЕРЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПАРА

§ 7.1. Общие сведения

Одним из важнейших параметров технологических процессов является расход протекающих по трубопроводам веществ.

Необходимость повышения качества выпускаемой продукции и эффективности автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) придает вопросам точного измерения количества и расхода различных веществ исключительно важное значение. К средствам, измеряющим количество и расход веществ при товароучетных операциях, предъявляются высокие точностные требования.

Многообразие измеряемых сред, характеризующихся различными физико-химическими свойствами, а также различные требования, предъявляемые промышленностью к метрологическим характеристикам и надежности измерителей расхода, привели к созданию средств измерения расхода, основанных на различных принципах и методах измерения.

Количество вещества определяют его массой или объемом и измеряют соответственно в единицах массы (кг, т) или в единицах объема (м^3 , л). Средства измерений количества вещества за некоторый промежуток времени (сутки, месяц и т. д.) называют *счетчиками*. Количество вещества V в единицах объема, прошедшее через счетчик за выбранный промежуток времени $\Delta t = t_2 - t_1$ определяется по разности показаний счетчика N_2 и N_1 взятых во время τ_2 и τ_1 , т. е.

$$V = q_V(N_2 - N_1) \quad (7.1)$$

где q_V — постоянная счетчика, определяющая количество вещества, приходящегося на единицу показания счетчика.

Расходом вещества называют количество вещества, протекающее через данное сечение канала в единицу времени.

Различают объемный расход, измеряемый в $\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, л/мин и т. д., и массовый расход, измеряемый в кг/с, кг/ч, т/ч и т. д. Необходимо различать понятия «средний расход» и «истинный (мгновенный) расход». Например, средний объемный расход равен

$$Q_{cp} = \frac{V}{t_2 - t_1} \quad (7.2)$$

где V —объем вещества, измеренный счетчиком за время $t_2 - t_1$.

Истинным, или мгновенным, расходом называют производную от количества (объема V или массы m) по времени.

$$Q = dV/d\tau; \quad (7.3)$$

$$G = dm/dx. \quad (7.4)$$

Средства измерений расхода называют *расходомерами*. Интегрируя сигнал расходомера по времени, можно определить количество вещества, прошедшее через расходомер за интервал времени $t_2 - t_1$ т. е.

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q dt \quad (7.5)$$

или

$$m = \int_{t_1}^{t_2} G dt \quad (7.6)$$

Приборы, работающие в комплекте с расходомерами и реализующие операцию интегрирования его сигнала, называют интеграторами расходомеров. При измерении расходов газа с целью получения результата измерения, не зависящего от давлений и температуры потока, его выражают в объемных единицах, приведенных к нормальным условиям. В качестве нормальных условий в технике приняты: температура $t_n = 20^\circ\text{C}$, давление $P_n = 101\,325$ Па (760 мм рт. ст.) и относительная влажность $\varphi = 0$.

§ 7.2. Объемные счетчики

Принцип действия объемных счетчиков основан на непосредственном отмеривании объемов измеряемой среды с помощью мерных камер известного объема и подсчета числа порций, прошедших через счетчик.

Объемные счетчики подразделяют на опорожняющиеся и вытесняющие. Опорожняющиеся объемные счетчики имеют жесткие камеры, из которых измеряемая среда свободно вытекает. Счетчики этого типа непригодны для измерения количества газа.

Простейшим объемным счетчиком с жесткой камерой является мерный бак или мерник. К этому же типу объемных счетчиков относятся барабанные и опрокидывающиеся счетчики.

Вытесняющие объемные счетчики имеют мерные камеры с перемещающимися стенками, которые вытесняют измеряемую фазу, освобождая камеру для следующей порции.

К объемным счетчикам указанного типа относятся: однопоршневые, многопоршневые, кольцевые, с овальными шестернями, ротационные, сухие газовые, мокрые газовые и дисковые.

Наиболее распространенным объемным счетчиком жидких веществ является счетчик с овальными шестернями (рис. 7.1). Внутри корпуса 3 размещены две находящиеся в зацеплении овальные шестерни 1 и 2. Набегающий на шестерни измеряемый поток создает на них перепад давления P_1 и P_2 . Под действием этого перепада поток в положении, показанном на рис. 7.1, а, создает на овальной шестерне 1 крутящий момент и заставляет вращаться эту шестерню, которая ведет шестерню 2.

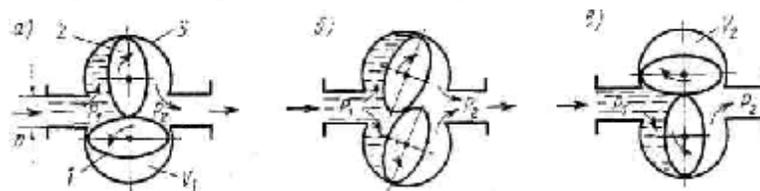


Рис. 7.1. Схема счетчика с овальными шестернями

В положении, показанном на рис. 7.1,б, крутящий момент возникает на обеих шестернях, а в положении на рис. 7.1,в крутящий момент действует на шестерню 2, которая теперь ведет шестерню 1.

Вращение шестерни происходит в направлении стрелок. В положении, представленном на рис. 7.1, а, происходит заполнение объема между корпусом и левой частью шестерни 2, а объем правее этой шестерни вытесняется. В том же положении (рис. 7.1, а) между шестерней 1 и корпусом отсекается измеряемый объем жидкости V_1 , которая будет затем вытесняться в положениях, представленных на рис. 7.1, б, в. За один оборот шестерен измерительные полости V_1 и V_2 дважды наполняются и дважды опорожняются. В итоге за один оборот через счетчик проходит объем жидкости, равный четырем объемам V_2 (или V_1). Ось одной из шестерен вращает счетный механизм, расположенный вне корпуса прибора.

Для уменьшения трения между торцевыми поверхностями шестерен и стенками корпуса шестерни устанавливаются на горизонтальных осях. Благодаря высокой точности измерения (погрешность $\pm (0,5—1) \%$ от измеряемого значения), малой потере давления, независимости показания от вязкости, значительному вращающему моменту счетчики с овальными шестернями используются для измерения различных жидкостей, в том числе нефти и нефтепродуктов.

Существенным недостатком этих счетчиков является необходимость хорошей фильтрации измеряемой среды от механических примесей, а также высокий уровень акустического шума. Калибр D выпускаемых счетчиков 12—250 мм, а предел измерений 0,01—250 м³/ч.

Для измерения газовых потоков применяют ротационные газовые счетчики, принцип действия которых аналогичен принципу

действия счетчиков с овальными шестернями. Они имеют калибр 50—1200 мм и служат для измерения номинальных расходов от 40 до 40 000 м³/ч и классы точности 2 и 3.

К числу объемных счетчиков, используемых для измерения количества нефтепродуктов, минеральных масел, а также ряда агрессивных жидкостей, относятся лопастные счетчики.

Имеется ряд конструктивных вариантов лопастных счетчиков, основными элементами которых являются вращающийся барабан и

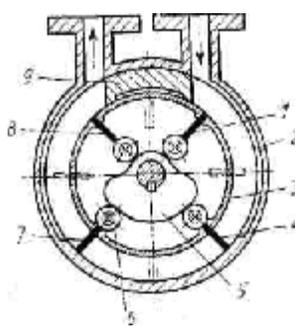


Рис. 7.2. Схема лопастного счетчика

пластичные лопасти. Одним из перспективных счетчиков с точки зрения кинематических и метрологических качеств является лопастный счетчик с кулачковым управлением движения лопастей (рис. 7.2).

Счетчик представляет собой цилиндрический корпус 2 с подвижным барабаном 3, внутри которого расположен неподвижный кулачок 5. На кулачок опираются четыре ролика 6 с закрепленными на них лопастями 1, 4, 7 и 8. В пространстве между внутренней поверхностью корпуса 2 и поверхностью барабана 3 движется измеряемая жидкость. Барабан вращается за счет давления поступающей жидкости, действующей на лопасть 4. При вращении барабана ролики 6 катятся по кулачку 5 и при этом поочередно занимают место снаружи и внутри барабана. Вращение барабана передается на счетный механизм. За один оборот барабана через счетчик проходит объем жидкости, соответствующий кольцевому пространству между корпусом и барабаном. Перетеканию жидкости из входа на выход препятствует вкладыш 9.

Лопастные счетчики успешно работают как в стационарных условиях на нефтехимических заводах, так и на передвижных агрегатах— в автозаправщиках. Выпускаются счетчики с диаметрами условного прохода 100—150 мм, с верхними пределами измерений 100—300 м³/ч и классами точности 0,25—0,5.

§ 7.3. Скоростные счетчики

Скоростные, как и объемные, счетчики применяют для определения объемного количества измеряемой среды. Однако в отличие от объемных скоростные счетчики не имеют измерительных камер и производят косвенное измерение количества веществ в объемных единицах.

Чувствительным элементом скоростных счетчиков является аксиальная или тангенциальная турбинка, приводимая во вращение потоком жидкости, протекающим через счетчик.

Принцип действия скоростных счетчиков основан на том, что число оборотов турбинки в единицу времени n пропорционально скорости потока, омывающего турбинку:

$$n = kW, \quad (7.7)$$

где k — коэффициент пропорциональности; W — скорость потока в некотором сечении счетчика F .

Объемный расход через счетчик равен

$$Q = WF. \quad (7.8)$$

Решая совместно (7.8) и (7.7), получим

$$n = \frac{k}{F} dV \quad (7.9)$$

Отсюда следует, что шкала тахометра, измеряющего мгновенное число оборотов турбинки n , может быть проградуирована в единицах объемного расхода измеряемого потока жидкости. Выражение (7.9) с учетом (7.3) примет вид

$$V = \frac{F}{k} (N_2 - N_1) \quad (7.10)$$

Интегрируя (7.10) в интервале времени $t_2 - t_1$, получим

$$V = \frac{F}{k} (N_2 - N_1) \quad (7.11)$$

где $N_2 - N_1 = \int_{t_1}^{t_2} n dt$ — разность показаний счетного механизма в

интервале времени $t_2 - t_1$ или число оборотов турбинки в этом интервале.

Таким образом, измеряя суммарное число оборотов турбинки с помощью счетного механизма оборотов, можно получать информацию об объемном количестве вещества. Если же скоростной счетчик снабжен тахометром, то он может измерять объемный расход потока.

При использовании скоростного счетчика в качестве измерителя объемного расхода вещества обычно применяют электрический тахогенератор. Ротор этого генератора получает вращение от оси турбинки скоростного счетчика, а индуцированная в статоре ЭДС измеряется вторичным прибором — вольтметром.

Схема скоростного счетчика с аксиальной турбинкой показана на рис. 7.3. Внутри корпуса размещена горизонтально вдоль направления измеряемого потока жидкости турбинка 6, выполненная в виде многозаходного винта. Перед турбинкой установлен струевыпрямитель 1, предназначенный для сглаживания возмущений потока на входе и исключения завихрения. Вращение турбинки через червячную пару 5 и передаточный механизм 2, расположенный в камере 4, передается через сальник счетному устройству 3.

Для регулирования скорости вращения турбинки в процессе тарировки счетчика предусмотрено регулировочное устройство 7, которое позволяет поворачивать одну из радиальных перегородок струевыпрямителя относительно направления потока.

Счетчики с аксиальной турбинкой изготавливают с диаметрами условного прохода 50—300 мм для измерения количества вещества при расходах 3—1300 м³/ч, классы точности 1; 1,5; 2.

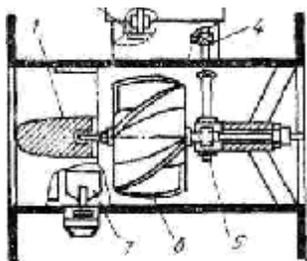


Рис. 7.3. Схема скоростного счетчика с аксиальной турбинкой

Для измерения количества жидкости при малых расходах используются скоростные счетчики с тангенциальными турбинками. В этих счетчиках турбинка с прямолинейными или криволинейными лопастями установлена на вертикальной оси.

Поток жидкости тангенциально подводится к турбинке и приводит ее во вращение. В зависимости от способа подвода жидкости к лопастям турбинки различают одноструйные и многоструйные счетчики. Жидкость в одноструйных счетчиках (рис. 7.4, а) подводится к прямому гладкому каналу на Лопастях турбинки 1 одной струей через фильтр 2.

В многоструйных счетчиках (рис. 7.4, б) корпус выполнен так, что в нем имеется два ряда равномерно распределенных по окружности сопел. Расположение сопел в корпусе счетчика показано на рис. 7.4, в. Через нижний ряд сопел 2 жидкость подается на турбинку 1, а через верхний ряд сопел 3 отводится из камеры вращения турбинки. Одноструйные счетчики более просты по конструкции и в них меньше потеря давления, но они имеют меньшую тангенциальной турбинкой имеют диаметр условного надежность из-за одностороннего износа опоры турбинки.

Счетчики с тангенциальной турбинкой имеют диаметр условного

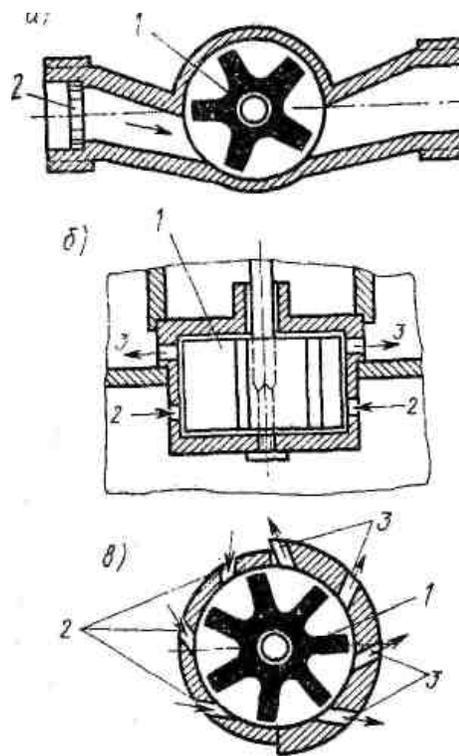


Рис. 7.4. Схема скоростного счетчика с тангенциальной турбинкой

прохода 15—40 мм, верхний предел измерений по расходу 3— 2,0 м³/ч и классы точности 2—3.

Существенным недостатком скоростных счетчиков является зависимость показаний от вязкости измеряемой жидкости.

§ 7.4. Расходомеры переменного перепада давления (дроссельные расходомеры)

Одним из самых распространенных принципов измерения расхода жидкостей, газов и паров является принцип переменного перепада давления на сужающем устройстве.

Широкое использование этого принципа связано с рядом присущих ему преимуществ. К их числу относятся: простота и надежность, отсутствие движущихся частей, легкость серийного изготовления средств измерений практически на любые давления и температуры измеряемой среды, низкая стоимость, возможность измерения практически любых расходов и, что особенно существенно, возможность получения градуировочной характеристики расходомеров расчетным путем, т. е. без использования дорогостоящих расходоизмерительных метрологических установок.

В соответствии с рассматриваемым принципом в трубопровод устанавливают сужающее устройство. При протекании измеряемого потока через отверстие сужающего устройства увеличивается скорость потока по сравнению с его скоростью до сужения. Благодаря этому давление потока на выходе из сужающего устройства уменьшается и на сужающем устройстве создается перепад давления, измеряемый дифманометром, который, как будет показано ниже, зависит от скорости в сужении или от расхода потока.

На рис. 7.5, а приведена идеализированная картина потока, протекающего в трубопроводе 1 через сужающее устройство 2 типа «диафрагма», а также графики распределения давления (рис. 7.5, б) и скорости (рис. 7.5, в).

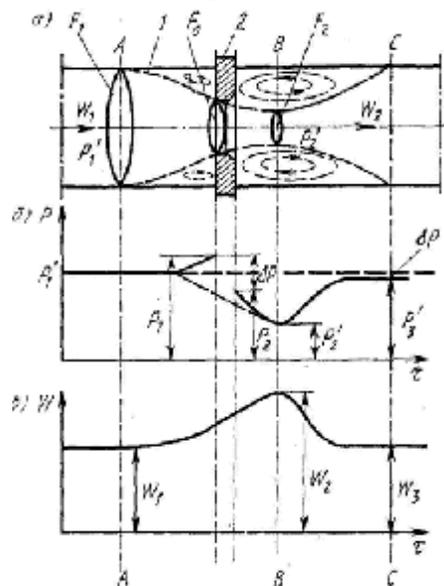


Рис. 7.5. Картина течения вещества через диафрагму (а) и эпюры давления (б) и скорости (в)

Выделим в трубопроводе три сечения: $A-A$ — перед сужающим устройством, где еще нет его влияния на поток; $B-B$ — место наибольшего сужения струи; $C-C$ — сечение после сужающего устройства, где устанавливаются скорость и давление потока.

Пройдя сечение $A-A$, поток сжимается, и благодаря действию сил инерции сжатие продолжается и на выходе из диафрагмы достигает наибольшего значения на некотором расстоянии за ней (сечение $B-B$). Уменьшение сечения струи приводит к увеличению скорости от W_1 в сечении $A-A$ до W_2 в сечении $B-B$. Что касается давления, то здесь необходимо различать давление у стенки трубы и на ее оси. Как видно из графика (рис. 7.5,б), давление в одной и той же плоскости неравномерно. Давление у стенки трубы (сплошная линия) непосредственно перед диафрагмой P_1 несколько возрастает (за счет уменьшения скорости в этом месте), а по оси трубы (штрихпунктирная линия) уменьшается и достигает минимума P'_2 в сечении $B-B$. Далее, по мере расширения потока, скорость потока уменьшается, а давление у стенки трубы возрастает, и в сечении $C-C$ эти значения устанавливаются.

Изменение давления струи по оси трубопровода практически совпадает с изменением давления около его стенки, за исключением участка перед диафрагмой и непосредственно в ней. Однако если скорость потока W_3 в сечении $C-C$ в идеальном случае равна скорости W_1 до сужения, т. е. в сечении $A-A$, то давление P'_3 в сечении $C-C$ не достигает прежнего значения на величину $\Delta P = P'_1 - P'_2$, называемую безвозвратной потерей давления. Эта потеря давления связана с затратой части энергии потока на вихреобразования в мертвых зонах (в основном за диафрагмой) и на трение.

Выведем уравнение расхода для несжимаемой жидкости, протекающей через диафрагму. При этом примем следующие предпосылки: движение жидкости установившееся, поток однороден и его фазовое состояние не меняется при прохождении через диафрагму, поток полностью заполняет все сечение трубопровода до и после сужающего устройства, отсутствуют возмущения потока, а прямые участки трубопровода достаточно велики.

Для горизонтального участка трубопровода уравнение энергии потока несжимаемой жидкости для сечений $A-A$ и $B-B$ (рис. 7.5) будет

$$\frac{P'_1}{\rho} + \frac{W_1^2}{2} = \frac{P'_2}{\rho} + \frac{W_2^2}{2} + \chi \frac{W_2^2}{2} \quad (7.12)$$

где P'_1 и P'_2 — абсолютные статические давления соответственно в сечениях $A-A$ и $B-B$; W_1 и W_2 — скорости потока соответственно в сечениях $A-A$ и $B-B$; ρ — плотность жидкости; χ — коэффициент гидравлических потерь; $\chi \frac{W_2^2}{2}$ — потеря энергии на трение на участке $A-A-B-B$.

Согласно уравнению неразрывности струи

$$F_1 W_1 = F_2 W_2 \quad (7.13)$$

где F_1 и F_2 — площади поперечного сечения потока соответственно в сечениях $A-A$ и $B-B$.

Введем следующие обозначения:

$$F_0/F_1 = d^2/D^2 = m, \quad (7.14)$$

$$F_2/F_0 = \mu, \quad (7.15)$$

где F_0 и d — площадь и диаметр входного отверстия сужающего устройства; D — диаметр трубопровода; m — относительная площадь (модуль) сужающего устройства; μ — коэффициент сужения струи. Из уравнения (7.13) и выражений (7.14) и (7.15) имеем

$$W_1 = \mu m W_2 \quad (7.16)$$

Подставляя это значение W_1 в уравнение (7.12), определим скорость потока в месте наибольшего сужения:

$$W_2 = \frac{1}{\sqrt{x^2 - m^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{r} (P_1' - P_2')} \quad (7.17)$$

Обычно перепад давления измеряют не в сечениях $A-A$ и $B-B$ (т. е. не P_1' — P_2'), а непосредственно до и после сужающего устройства, а именно $\Delta P = P_1 - P_2$. Соотношение между указанными перепадами устанавливается с помощью поправочного коэффициента ψ , т. е.

$$\sqrt{P_1' - P_2'} = \psi \sqrt{P_1 - P_2} \quad (7.18)$$

Тогда уравнение (7.17) примет вид

$$W_2 = \frac{\psi}{\sqrt{x - m^2 m^2}} \sqrt{\frac{2}{r} (P_1 - P_2)} \quad (7.19)$$

Массовый расход вещества

$$G = W_2 F_2 \rho = W_2 \mu F_0 \rho$$

Подставляя сюда W_2 из выражения (7.19), получим

$$G = \frac{\psi m}{\sqrt{x - m^2 m^2}} F_0 \sqrt{2r (P_1 - P_2)} \quad (7.20)$$

Коэффициенты (μ и ψ не могут быть определены независимо друг от друга. Исходя из этого, их объединяют в один экспериментально определяемый комплексный коэффициент a , называемый коэффициентом расхода:

$$a = \frac{\psi m}{\sqrt{x - m^2 m^2}} \quad (7.21)$$

Таким образом, учитывая выражения (7.20) и (7.21) и принимая во внимание, что $F_0 = \pi d^2/4$, получим уравнения для массового G и объемного Q расходов несжимаемой жидкости:

$$G = a \frac{\rho d^2}{4} \sqrt{2r(P_1 - P_2)} \quad (7.22)$$

$$Q = a \frac{\rho d^2}{4} \sqrt{\frac{2}{r}(P_1 - P_2)} \quad (7.23)$$

Если через сужающее устройство протекает сжимаемая среда (газ или пар), то вследствие понижения давления увеличивается ее объем. Это приводит к тому, что скорость потока возрастает и становится больше скорости несжимаемой среды. В результате на сужающем устройстве увеличивается перепад давления.

Учет указанного явления производится введением в уравнения расходов (7.22) и (7.23) дополнительного коэффициента $\varepsilon < 1$, называемого поправочным множителем на расширение измеряемой среды.

Тогда уравнения для массового G и объемного Q расходов сжимаемой среды запишем в виде:

$$G = C a \varepsilon d^2 \sqrt{r(P_1 - P_2)} \quad (7.22)$$

$$Q = C a \varepsilon d^2 \sqrt{\frac{1}{r}(P_1 - P_2)} \quad (7.23)$$

где $C = \frac{\rho}{4} \sqrt{2}$ — постоянный коэффициент; ρ — плотность среды в рабочих условиях на входе в сужающее устройство, т. е. при давлении P_1 и температуре T_1 перед сужающим устройством.

Уравнения (7.24) и (7.25) являются основными уравнениями расхода как для сжимаемых, так и несжимаемых сред, при этом для последних $\varepsilon = 1$. Использование уравнений (7.24) и (7.25) возможно только при условии, что скорость газа или пара меньше критической скорости.

Кроме диафрагмы (рис. 7.6, а) в дроссельных расходомерах в качестве сужающих устройств находят применение стандартные сопла (рис. 7.6,б), сопла Вентури (рис. 7.6, б) и трубы Вентури (рис. 7.6, в). На рис. 7.6 показаны места отбора давлений P_1 и P_2 от сужающих устройств к дифманометру. Характерной особенностью сужающих устройств (рис. 7.6, б, в, в) является меньшая, чем для диафрагмы, безвозвратная потеря давления при одном и том же значении модуля m сужающего устройства (см. рис. 7.10).

Характеристика величин, входящих в уравнение расхода. Проанализируем величины, входящие в уравнения (7.24) и (7.25), и зависимость их от параметров измеряемого потока.

Коэффициент C не зависит от параметров измеряемого потока, он зависит от выбора единиц измерения, типа используемого диф-

манометра, а также от плотности сред, заполняющих импульсные трубки, соединяющие сужающее устройство с дифманометром.

Коэффициент расхода a , выражаемый формулой (7.21), не может быть пока точно рассчитан теоретическим путем. Значения этого коэффициента для некоторых типов сужающих устройств определены экспериментально.

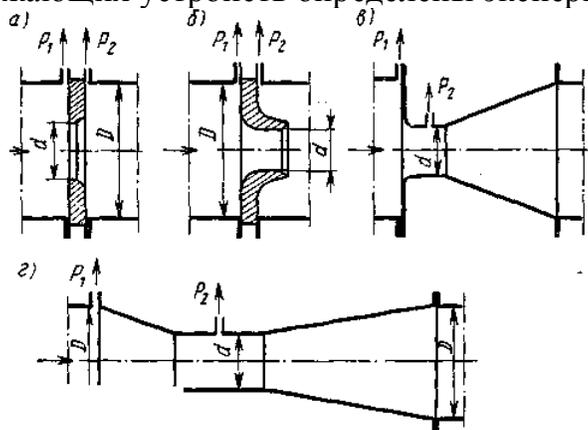


Рис. 7.6. Схемы стандартных сужающих устройств

На основании экспериментальных исследований и использования аппарата теории подобия установлено, что два сужающих устройства одинаковой конфигурации обладают одинаковыми коэффициентами расхода, если имеет место подобие их геометрических форм и равенство модулей m , при условии, что протекающие через сужающие устройства потоки имеют равные числа Рейнольдса Re , т. е. гидродинамически подобны.

Таким образом, в общем виде коэффициент расхода

$$a = f(Re_D, m) \quad (7.26)$$

Число Рейнольдса Re_D , отнесенное к диаметру трубопровода D , определяется по формуле

$$Re_D = 0,354 \frac{G}{D \nu} = 0,354 \frac{G}{D \eta} = 0,354 \frac{Q}{D \nu} = 0,354 \frac{Q \rho}{D \eta} \quad (7.27)$$

где ν и η — соответственно кинематическая (m^2/c) и динамическая (Па·с) вязкости измеряемой среды в рабочих условиях; G , Q — соответственно массовый (кг/ч) и объемный ($m^3/ч$) расходы в рабочих условиях; ρ — плотность измеряемой среды в рабочих условиях, $кг/м^3$.

На рис. 7.7 приведены экспериментально найденные зависимости (7.26) коэффициента расхода для условий установившегося потока, протекающего в гладких трубах через стандартную диафрагму (рис. 7.7, а) с идеально заостренной прямоугольной входной кромкой, стандартное сопло и сопло Вентури (рис. 7.7, б). Коэффициент расхода, определяемый в указанных условиях, называют исходным коэффициентом расхода α_n -

Из графика рис. 7.7 следует, что зависимость коэффициента расхода от Re проявляется тем сильнее, чем меньше Re . С возрастанием Re уменьшается его

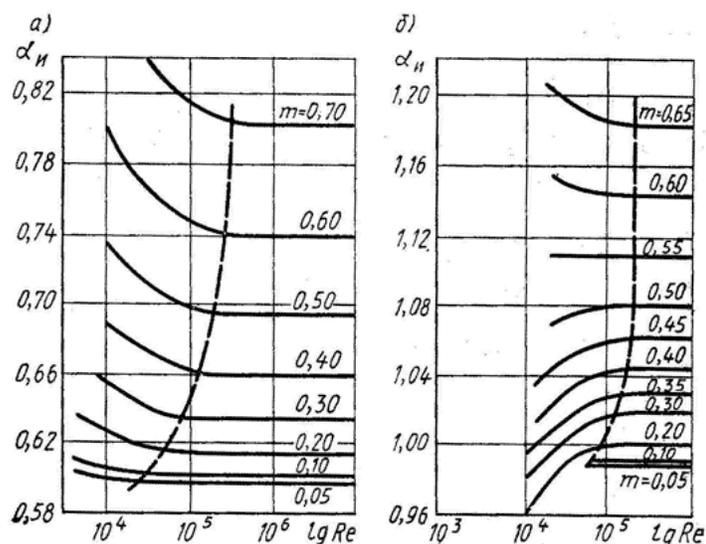


Рис. 7.7. Зависимости исходного коэффициента расхода α_n от числа Рейнольдса:
а — для стандартных диафрагм; б — для стандартных сопел и сопел Вентури

влияние на коэффициент расхода. Для одного и того же значения m при Re , превышающем некоторое предельное значение Re_{np} , коэффициент расхода практически не изменяется, т. е. поток приобретает автомодельный характер. Наличие автомодельной области для коэффициентов расхода при $Re > Re_{np}$ для сужающих устройств типа диафрагмы, сопла и сопла Вентури позволяет использовать для их определения табличные значения коэффициентов расхода, приводимые в нормативных документах [17].

Указанные сужающие устройства не требуют проведения индивидуальных градуировок и называются стандартными сужающими устройствами. Стандартные сужающие устройства могут быть использованы для диаметров трубопроводов не менее $D > 50$ мм, в противном случае увеличивается погрешность определения коэффициента расхода. Как видно из графиков рис. 7.7, значение Re_{np}

различно для различных значений m . С уменьшением m уменьшается $Re_{пр}$. Отсюда следует практический вывод: при выборе малых значений m есть определенная гарантия того, что в процессе измерения расхода его уменьшение не приведет к изменению выбранного значения α_n

Условия, при которых определялся исходный коэффициент расхода (трубопровод с гладкой внутренней поверхностью, а в случае использования диафрагмы — острота ее входной кромки), в реальных условиях измерения практически не выдерживаются. Исходя из этого, коэффициент расхода α определяют по формулам:

для диафрагм

$$\alpha = \alpha_n k_{ш} k_{п} \quad (7.28)$$

для стандартных сопл и сопл Вентури

$$\alpha = \alpha_n k_{ш} \quad (7.29)$$

где $k_{ш}$ — поправочный множитель на шероховатость трубопровода (рис. 7.8); $k_{п}$ — поправочный множитель на притупление входной кромки диафрагмы (рис. 7.9).

Как следует из рис. 7.8, для трубопроводов диаметром 300 мм и более влияние шероховатости можно не учитывать.

Поправочный множитель на расширение измеряемой среды ε вводится в уравнение расхода при измерении расхода газа и паров

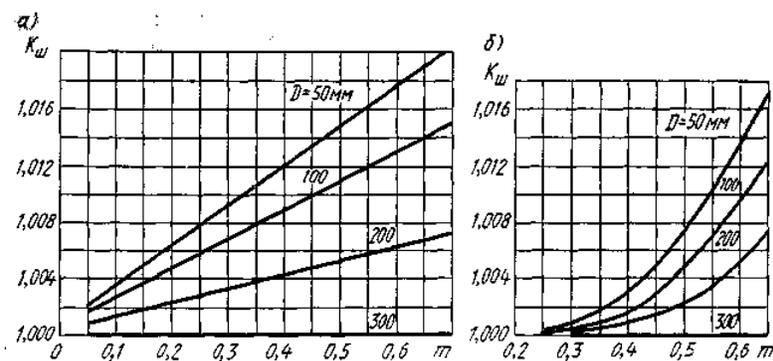


Рис. 7.8. Зависимость поправочного множителя $k_{ш}$ от диаметра трубопровода и модуля сужающего устройства:

а — для диафрагм; б — для стандартных сопл и сопл Вентури

и учитывает изменение их плотности при протекании через сужающее устройство. Для несжимаемых жидкостей $\varepsilon = 1$. В общем случае поправочный множитель ε представляется в виде

$$\varepsilon = f(\Delta P / P_1, m, c) \quad (7.30)$$

где $\Delta P / P_1$ — отношение перепада давления к давлению до сужающего устройства; χ — показатель политропы измеряемой среды.

Зависимость ε для стандартных диафрагм может быть выражена эмпирическим уравнением [17]:

$$e = 1 - (0,41 + 0,35m^2) \frac{\Delta P}{P_1 c} \quad (7.31)$$

Для стандартных сопл, сопл Вентури и труб Вентури поправочный множитель ε может быть подсчитан аналитически [17]:

$$e = \left[\frac{(1 - m^2) \frac{c}{c-1} y^{2/c} 1 - y^{(c-1)/c}}{1 - m^2 c^{2/c} \frac{\Delta P}{P_1}} \right]^{0,5} \quad (7.32)$$

Значения ε , подсчитанные по уравнениям (7.31) и (7.32), приведены в таблицах [17]. Поправочный множитель ε , найденный по таблицам,

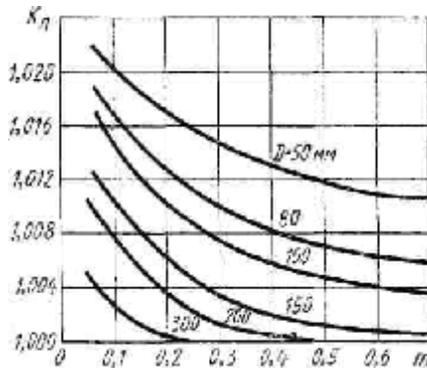


Рис. 7.9. Зависимость поправочного множителя K от диаметра трубопровода и модуля сужающего устройства

действителен только для определенного значения $\Delta P/P_1$. При измерении расхода в силу изменения $\Delta P/P_1$ изменение ε может достигать $\pm 5\%$ и более, особенно при измерении расхода газа или пара с помощью диафрагм. Для уменьшения дополнительной погрешности измерения расхода, связанной с изменением ε , при изменении перепада давлений ΔP в уравнение расхода подставляют значение ε , которое находят по перепаду ΔP_{cp} , соответствующему вероятному значению среднего расхода. При этом необходимо учесть, что чем меньше отношение $\Delta P/P$, тем меньше изменение ε при изменении расхода.

Диаметры трубопровода D и сужающего устройства d должны быть учтены в уравнении расхода при рабочей температуре t . Соотношение их с соответствующими диаметрами при температуре

20°C , т. е. D_{20} и d_{20} , определяется выражениями:

$$D = k_t' D_{20}; d = k_t d_{20},$$

где k_t' и k_t — поправочные множители на тепловое расширение материала трубопровода и сужающего устройства. При температуре от -20 до $+60^\circ\text{C}$ можно принять $k_t' = k_t = 1$.

Плотность измеряемой среды ρ , входящая в уравнения (7.24) и (7.25), определяется по состоянию потока в рабочих условиях до сужающего устройства. Если известна плотность жидкости при тем-

пературе 20°C — t_{20} , то плотность ρ при рабочей температуре t_1 определяют по формуле

$$r = r_{20}[1 - b(t_1 - 20)], \quad (7.33)$$

где ρ — средний коэффициент объемного расширения жидкости в интервале t_{20} — t_1 .

Плотность сухого газа в рабочих условиях при температуре T_1 и давлении P_1 может быть определена по известной плотности газа ρ_n в нормальных условиях [$T_n = 293 \text{ K}$, $P_n = 101\,325 \text{ Па}$ ($1,0332 \text{ кгс/см}^2$)] по формуле

$$r = r_n \frac{PT_n}{zP_nT}, \quad (7.34)$$

где z — коэффициент сжимаемости газа.

Перепад давления ΔP является одним из основных параметров, характеризующих расход вещества, и измеряется дифманометром.

Основные сведения о выборе сужающих устройств. Как указывалось, в качестве сужающего устройства при измерении расхода могут быть использованы диафрагмы, стандартные сопла и сопла Вентури. Простота конструктивного исполнения диафрагм и значительно меньшая стоимость обуславливают преимущественное их применение. Однако в каждом конкретном случае измерения расхода необходимо принимать во внимание еще следующие факторы. Если потеря давления на сужающем устройстве лимитируется, то при выборе сужающего устройства необходимо принять во внимание эту потерю, определяемую по графику (рис. 7.10). Как видно из приведенного графика, потеря давления ΔP выражается как часть перепада давления ΔP на сужающем устройстве и зависит от типов сужающих устройств с увеличением их модуля

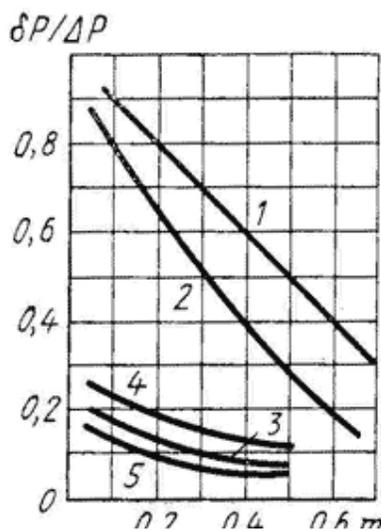


Рис. 7.10. Зависимость потери давления на сужающем устройстве от модуля

давления. При одном и том же, m потеря давления в диафрагме больше, чем в других сужающих устройствах. Однако при равных перепадах давления и расхода среды значения модуля диафрагмы больше, чем для сопла, так как при одинаковых модулях коэффициент расхода диафрагмы (см. рис. 7.7, а) меньше, чем коэффициент расхода для сопла (см. рис. 7.7, б). Поэтому потеря давления при использовании диафрагмы или сопла практически одна и та же. У сопел Вентури потеря давления значительно меньше, что физически объясняется наличием диффузора на выходе, благодаря которому идет восстановление потенциальной энергии.

Помимо учета потери давления на сужающем устройстве, уменьшающегося с увеличением m , необходимо принять во внимание, что при этом могут возникнуть условия, дестабилизирующие коэффициент расхода в процессе измерения ($Re < Re_{np}$). Увеличение m отрицательно сказывается также на точности измерения расхода из-за увеличения погрешности определения коэффициента расхода. При этом в большей степени на точность измерения отрицательное влияние оказывают местные сопротивления в трубопроводе (необходимо увеличивать прямые участки трубопровода до сужающего устройства и после него). Таким образом, в случае измерения расхода жидкости, когда задано значение допустимой потери давления на сужающем устройстве, его оптимальный модуль выбирают с учетом указанных противоречивых требований. Если потерю давления на сужающем устройстве можно не принимать во внимание, то рекомендуется выбирать модуль $m = 0,2$.

При измерении расхода газа или пара, выбирая m , необходимо также учесть влияние значения отношения $\Delta P/P$ на погрешность определения поправочного множителя на расширение ϵ . Значение погрешности определения ϵ прямо пропорционально значению отношения $\Delta P/P$ [17]. Кроме того, в процессе измерения расхода возникает дополнительная погрешность ϵ , обусловленная отклонением расчетного значения ϵ (при перепаде давления для среднего расхода) от значения ϵ , соответствующего перепаду давления при истинном расходе. В этом случае дополнительная погрешность ϵ тем больше, чем больше значение отношения $\Delta P/P$. Таким образом, выбирая большое значение модуля m сужающего устройства, на котором перепад давления ΔP будет мал, можно значительно уменьшить погрешность от изменения ϵ . В то же время при увеличенных значениях m растет погрешность измерения расхода за счет погрешности коэффициента расхода.

Следовательно, при измерении расхода газа и пара, даже и тогда, когда потеря давления на сужающем устройстве не имеет значения, выбор оптимального модуля сужающего устройства должен решаться путем компромиссного удовлетворения противоречивых требований. В настоящее время сужающие устройства рассчитывают в соответствии с [17].

Погрешность измерения расхода в соответствии с принципом переменного перепада. Согласно правилам определения среднеквадратической погрешности для косвенных измерений (см. гл. 1, 3) при отсутствии корреляции между погрешностями величин, входящих в уравнения расхода (7.24) и (7.25), погрешность может быть представлена в виде

$$s_Q = \sqrt{s_a^2 + s_\epsilon^2 + 4s_d^2 + s_p^2/4 + s_{\Delta p}^2/4}, \quad (7.35)$$

где $\sigma_Q, \sigma_a, \sigma_\epsilon, \sigma_p, \sigma_{\Delta p}$, — среднеквадратические относительные погрешности

Так как при изготовлении сужающего устройства диаметр его отверстия d может быть воспроизведен с высокой точностью, погрешностью $4s_d^2$ можно пренебречь ввиду ее малости по сравнению с другими слагаемыми, и тогда (7.35) примет вид

$$s_Q = \sqrt{s_a^2 + s_e^2 + s_p^2/4 + s_{\Delta p}^2/4}, \quad (7.36)$$

Погрешности, входящие в подкоренное выражение, определяются по [17]. Предельная относительная погрешность d_Q измерения расхода определяется как удвоенная s_Q , т. е. $d_Q = 2s_Q$. Значение этой предельной погрешности в настоящее время составляет при измерении расхода жидкости $\pm (2—3) \%$ и газа $\pm (3—5) \%$.

Структурные схемы систем измерений расхода вещества в соответствии с принципом переменного перепада давлений. Используя результаты анализа величин, входящих в уравнения расхода (7.24) и (7.25), в каждом конкретном случае может быть выбрана соответствующая структурная схема системы измерений расхода.

Если модуль сужающего устройства m выбран так, что обеспечивается постоянство коэффициента расхода a в заданном диапазоне измерения расхода вещества, и если при этом обеспечивается относительно малое изменение поправочного множителя e (при измерении сжимаемого вещества), то в общем случае непосредственному измерению подлежат плотность вещества в рабочих условиях до сужающего устройства и перепад давления $\Delta P = P_1 - P_2$ на нем. В частном случае, когда по трубопроводу протекает капельная жидкость постоянного состава и при постоянной температуре, т. е. плотность жидкости $\rho = \text{const}$, для измерения расхода достаточно использовать лишь прибор, измеряющий перепад давления — дифманометр. Шкалы дифманометра градуируются для подобного случая в единицах расхода и потому эти дифманометры называют дифманометрами — расходомерами.

Структурная схема, реализующая рассматриваемый случай, приведена на рис. 7.11, а. Схема рис. 7.11, б относится также к этому случаю, а отличие состоит в том, что измеряемый перепад давления преобразуется в унифицированный сигнал (электрический или пневматический), который поступает на вторичный прибор 4, шкала которого градуируется в единицах расхода, и одновременно на интегратор 5 для определения количества вещества.

Если плотность потока переменна и имеется возможность непосредственного ее измерения в рабочих условиях потока (см. гл. 10), то расход вещества измеряется в соответствии со структурной схемой (рис. 7.11, в). Здесь унифицированные сигналы измерителей перепада давления и плотности вещества поступают в вычислительное устройство 7, где обрабатываются в соответствии с уравнениями (7.24) и (7.25), а затем информация о расходе вещества поступает на вторичный прибор 4.

Если плотность вещества не может быть прямо измерена в рабочих условиях потока, то для газового потока измерение расхода

осуществляется по структурной схеме рис. 7.11, г, а расход жидкости— по схеме рис. 7.11, д.

При измерении расхода газового потока по схеме рис. 7.11, г унифицированные сигналы преобразователей температуры давления и плотности газа в нормальных условиях и перепада давления поступают в вычислительное устройство, осуществляющее расчет расхода газа. Для повышения точности

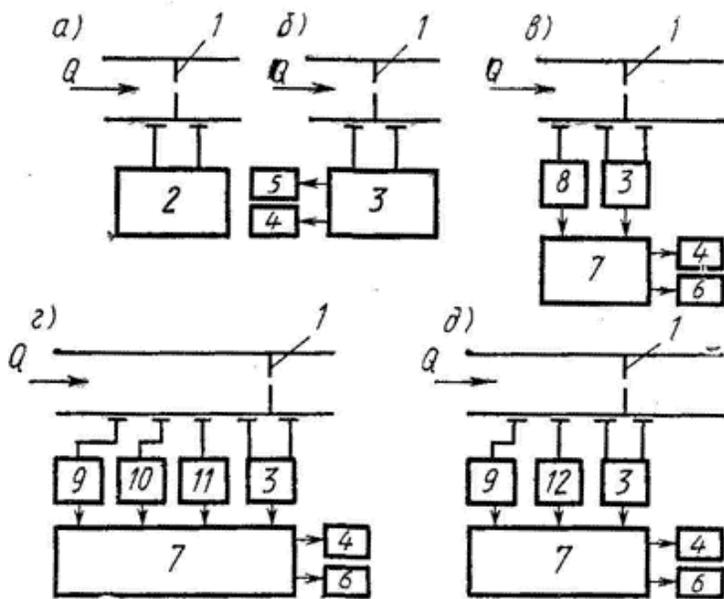


Рис. 7.11. Структурные схемы систем измерений расхода по перепаду давления на сужающем устройстве:

1 — сужающее устройство; 2 — дифманометр-расходомер; 3 — преобразователь перепада давления; 4 — вторичный прибор; 5 —интегратор расхода; 6 — прибор для отсчета количества вещества; 7 — вычислительное устройство; 8 — преобразователь плотности вещества в рабочих условиях; 9 — преобразователь температуры; 10 — преобразователь давления; 11 — преобразователь плотности газа в нормальных условиях; 12— преобразователь плотности жидкости при температуре 20°С

измерения расхода газа на вычислительное устройство в схеме рис. 7.11, г можно возложить функции расчета мгновенных значений ϵ по информации от преобразователей давления и перепада давления с использованием выражения (7.32).

По схеме рис. 7.11, д унифицированные сигналы от преобразователей температуры t и плотности жидкости ρ_{20} , соответ-

ствующей температуре 20°С, обрабатываются в вычислительном устройстве в соответствии с формулой (7.33), и рассчитывается расход жидкости, отсчитываемый на вторичном приборе.

При необходимости получения информации о количестве вещества,

прошедшего через трубопровод, операция интегрирования расхода в схемах рис. 7.11, в, г, д производится в вычислительном устройстве 7, а отсчет показаний количества на приборе 6.

Для определения количества вещества, протекающего по трубопроводу при неизменной плотности, могут быть использованы специальные интеграторы расхода 5 (рис. 7.11, б).

Схема одного из распространенных интеграторов приведена на рис. 7.12.

Пневматический интегратор расхода — устройство, которое помимо операции суммирования предварительно осуществляет операцию извлечения квадратного корня. Входной пневматический сигнал $P_{ВХ}$, изменяющийся в пределах 0,02—0,1 МПа, поступает от дифманометра в измерительный сильфон 5 и создает усилие P_I на рычаге 4, прикрепленном на крестовой пружинной подвеске 6 к корпусу прибора. При увеличении входного сигнала заслонка 2

приближается к соплу 1, и в проточной линии между соплом 1 и пневмосопротивлением 14 давление возрастает. Это давление поступает на вход пневматического усилителя 13, при этом увеличивается давление в линии выходного сопла 12. Струя воздуха, вытекающая из сопла 12, заставляет вращаться турбину 8 с грузами 7, которая приводит в движение через червячно-шестеренчатый редуктор 11, счетчик 9 и диск точного отсчета 10. Увеличение давления в сопле 12, а следовательно, и скорости турбины будет продолжаться до тех пор, пока вращающий момент M_2 на рычаге 4 от усилия R_2 , создаваемого центробежной силой грузов 7, не станет

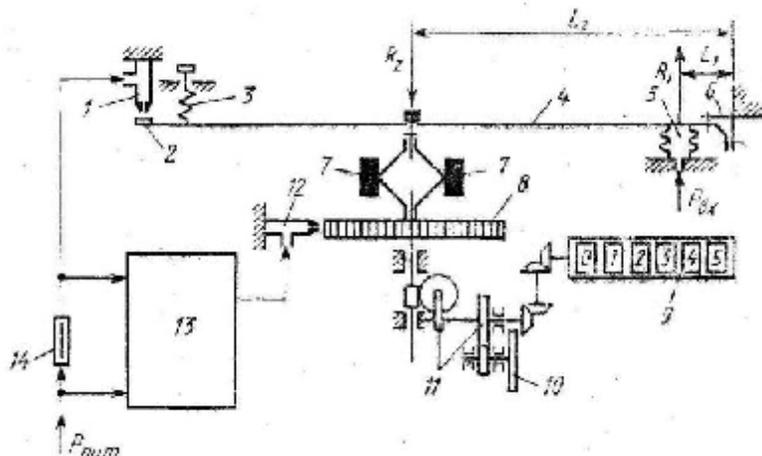


Рис. 7.12. Схема пневматического интегратора

равным вращающему моменту M_1 , создаваемому силой, развиваемой сильфоном 5. Моменты M_1 и M_2 соответственно равны $M_1 = L_1 F_{эф} (P_{вх} - 0,02)$; $M_2 = L_2 a v^2$, где L_1 и L_2 — плечи соответствующих сил относительно точки вращения рычага; $F_{эф}$ — эффективная площадь сильфона; a — постоянный коэффициент, зависящий от массы грузов 7 и расстояния от оси вращения; $P_{вх}$ — давление от дифманометра; ω — угловая скорость турбины. Приравняв M_1 и M_2 , получим

$$w = \sqrt{(L_1 F_{эф}) / (L_2 a)} \sqrt{(P_{вх} - 0,002)} = b \sqrt{(P_{вх} - 0,002)}$$

где $b = \sqrt{(L_1 F_{эф}) / (L_2 a)}$ — постоянный коэффициент.

Так как расход связан с сигналом от дифманометра зависимостью $G = b_0 \sqrt{(P_{вх} - 0,02)}$

(b_0 — постоянный коэффициент), то $G = b_0 v / b$, т. е. угловая скорость турбины интегратора пропорциональна расходу. Поэтому в счетчике 9 интегратора в каждый момент времени откладывается количество оборотов, пропорциональ-

ное расходу. За определенный отрезок времени τ_1 — τ_2 через трубопровод протекает количество вещества

$$V = \int_{t_1}^{t_2} Q dt \quad (7.37)$$

где bo/b — постоянный коэффициент интегратора.

Механический счетчик 9 суммирует мгновенные значения, а разность его показаний в моменты времени τ_2 и τ_1 определяет интеграл в последнем выражении, т. е. количество вещества.

Для вычитания из сигнала дифманометра начального сигнала 0,02 МПа служит пружина 3. Погрешность интегратора в диапазоне 30—100% сигнала датчика за какой-либо промежуток времени не превышает ± 1 % расчетной разности показаний счетчика, соответствующей номинальному значению входного сигнала за тот же промежуток времени.

Измерение расхода веществ при малых числах Рейнольдса. Для потоков веществ, имеющих число Рейнольдса меньше, чем его предельное значение $Re_{пр}$, использование стандартных сужающих устройств невозможно из-за непостоянства коэффициента расхода в этих областях значений числа Рейнольдса. Указанные потоки принято характеризовать как потоки с малыми числами Рейнольдса. К числу таких потоков относятся вязкие жидкости, в частности парафинистые нефти, мазуты и некоторые нефтепродукты, газовые потоки при высоких температурах, а также потоки с малым расходом вещества.

Для измерения расхода при малых числах Рейнольдса может быть использован принцип переменного перепада давления с применением специальных сужающих устройств (рис. 7.13), таких, как

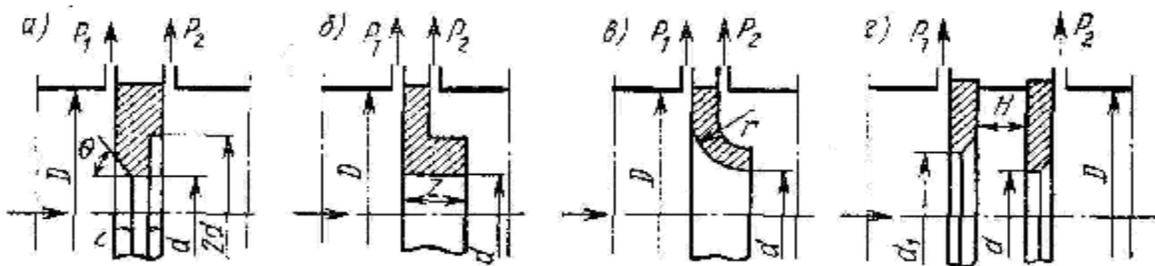


Рис. 7.13. Схема сужающих устройств для измерений расхода при малых числах Re

диафрагмы с коническим входом, цилиндрические сопла, сопла «четверть круга», двойные диафрагмы. На основании результатов исследований, приведенных в нормативных документах [18], установлено, что коэффициент расхода специальных сужающих устройств остается постоянным в определенных границах чисел Рейнольдса — от минимального $Re_{min пр}$ до максимального $Re_{max пр}$, в

зависимости от модуля m и диаметра d сужающего устройства, а также от диаметра D трубопровода (табл. 7.1).

Диафрагма с коническим входом (рис. 7.13, а) устанавливается скосом навстречу потоку. Угол входного конуса θ и глубина скоса c выполняются в пределах $\theta = 45,0 \div 31,2$; $c = (0,06 \div 0,11)d$ соответственно для $m = 0,01 \div 0,25$.

Таблица 7.1

Допустимые значения m , D , d , $Re_{\min \text{ пр}}$, $Re_{\max \text{ пр}}$ для специальных сужающих устройств

Специальное сужающее устройство	m	D , мм	d , мм	$Re_{\min \text{ пр}}$	$Re_{\max \text{ пр}}$
Диафрагма с коническим входом	0,01—0,25	12,5—100,0	6,0—50,0	40—260	$2,5 \cdot 10^4$ — $5 \cdot 10^4$
Цилиндрическое сопло	0,01—0,49	25,0—100,0	2,5—70,0	500—5500	$8 \cdot 10^3$ — $2 \cdot 10^5$
Сопло «четверть круга»	0,05—0,49	25,0—100,0	6,0—70,0	$2 \cdot 10^3$ — $5 \cdot 10^3$	$35 \cdot 10^3$ — $2 \cdot 10^5$
Двойная диафрагма	0,1—0,6	40,0—100,0	12,7—70,5	$2,5 \cdot 10^3$ — $15 \cdot 10^3$	$15 \cdot 10^4$ — $2 \cdot 10^5$

Они позволяют измерять расход потока со значительно меньшим числом Рейнольдса, чем при использовании всех остальных специальных сужающих устройств. Диаметром, по которому рассчитывают расход, является диаметр d цилиндрической части.

Цилиндрические сопла (рис. 7.13, б) имеют длину z , определяемую из зависимости $z/d=f(m)$. Так, $z/d = 1,4$; $2,1$ и $2,6$ соответственно при $m=0,01$; $0,20$ и $0,49$.

Сопло «четверть круга» (рис. 7.13, в) бывает нескольких разновидностей, отличающихся тем, что профиль сужающей части описывается дугой радиуса z из различных центров. Значение радиуса дуги определяют из соотношения $r/d=f(m)$.

Двойная диафрагма (рис. 7.13, г) состоит из двух стандартных диафрагм, размещенных друг от друга на расстоянии, равном $H=0,5D$. Основной является вторая по ходу потока диафрагма, имеющая диаметр d , по которому рассчитывают расход.

Расчет специальных сужающих устройств аналогичен расчету стандартных сужающих устройств [17].

Капиллярные расходомеры. Для измерения малых расходов в соответствии с принципом переменного перепада давления помимо указанных специальных сужающих устройств применяют капиллярные трубки (капилляры). Для этих трубок при определенном отношении длины l к диаметру d (обычно 50 и более) режим течения среды является ламинарным, а потери давления определяются вязкостным трением. Такое течение описывается законом Пуа-

зейля, а массовый и объемный расходы жидкости определяются соответственно из выражений:

$$G = \frac{\pi d^4 \rho}{128 \eta l} (P_1 - P_2) \quad (7.38)$$

$$Q = \frac{\pi d^4}{128 \eta l} (P_1 - P_2) \quad (7.39)$$

где ρ и η — плотность и динамическая вязкость жидкости.

Из выражений (7.38) и (7.39) следует, что массовый и объемный расходы являются линейными функциями перепада давления на капилляре. Поэтому статические характеристики капиллярного расходомера линейны.

Когда измеряемой средой является газ, то уравнение Пуазейля для массового расхода газа имеет вид

$$G = \frac{\pi d^4 (P_1^2 - P_2^2)}{256 \eta l R T} = \frac{\pi d^4 \rho_{cp}}{128 \eta l} (P_1^2 - P_2^2) \quad (7.40)$$

где $\rho_{cp} = (P_1 + P_2)/(2RT) = P_{cp}/(2RT)$ — средняя плотность в капилляре при температуре T . При небольших перепадах давления $P_1 - P_2$ значение ρ_{cp} может быть принято постоянным.

Так как вязкость измеряемого потока зависит от температуры, то для сохранения достаточной точности измерения необходимо капилляр поместить в термостат или автоматически вводить поправку на изменение вязкости, измеряя для этой цели температуру.

Диапазон измерений капиллярного расходомера сильно зависит от диаметра трубки. Однако из-за опасности засорения трубки диаметр брать малым не рекомендуется. Лучше увеличивать длину капилляра. Длинный капилляр выполняют в виде спирали, однако здесь нарушается линейная связь между ΔP и Q из-за действия центробежной силы.

При условии сохранения чистоты трубок капиллярные расходомеры имеют классы точности 0,5—1. Они могут измерять малые расходы до 1 г/ч. Однако с их помощью можно измерять и значительные расходы до 1500—2000 кг/ч путем установки пучка параллельных капилляров [14].

Как правило, капиллярные расходомеры требуют индивидуальной градуировки из-за трудности точного измерения диаметра, входящего в уравнение расхода в четвертой степени.

Особые случаи измерения расхода в соответствии с принципом переменного перепада давления. Сужающие устройства могут быть использованы для измерения расхода: запыленных и загрязненных сред, на входе и выходе из трубопровода, а также в трубопроводах с диаметром менее 50 мм.

Для измерения запыленных и загрязненных сред применяются сегментные диафрагмы (рис. 7.14). Они исключают возможность

отложения механических примесей и выделяющихся из жидкости газов у сужающего устройства, так как примеси здесь легко сносятся через соответствующим образом расположенное отверстие. При измерении расхода газов, содержащих примесь жидкой фазы, объемная концентрация c последней в газе должна быть в количестве $c \leq 0,4\rho/\rho_n$ (ρ — плотность измеряемой среды в рабочих условиях; ρ_n — плотность примеси). Примесь твердой фазы должна быть в количестве $c \leq \rho/\rho_n$. Для жидкостей, содержащих газовую фазу, измерение расхода возможно при $\Delta P/P \leq (0,04 + 4,8m^{0,4})$.

Если сегментная диафрагма применяется для загрязненных и запыленных сред, то ее отверстие располагают в нижней части поперечного сечения горизонтального трубопровода.

При измерении расхода жидкости, из которой могут выделяться газы, например газонасыщенной нефти, отверстие сегментной диафрагмы располагают в верхней части. Отверстия для отбора давлений необходимо делать со стороны, противоположной отверстию сужающего устройства. Требования для изготовления поверхностей сегментной диафрагмы те же, что и для стандартной диафрагмы. Коэффициент расхода определен для сегментных диафрагм с модулем $m = 0,10 \div 0,50$ для трубопроводов с $D = 50 \div 1000$ мм и для предельных значений чисел Рейнольдса в диапазоне от $Re_{\min \text{ пр}} = 5 \cdot 10^3$ — $4 \cdot 10^4$ до $Re_{\max \text{ пр}} = 10^6$ [18].

Измерения расхода на входе или выходе из трубопровода. Измерения в указанных условиях производятся с помощью стандартных диафрагм или сопел при соблюдении следующих условий.

При измерении расхода на входе на расстоянии не менее $20D$ по оси трубы и $10D$ перпендикулярно этой оси не должно быть никаких препятствий, и тогда коэффициент расхода для стандартных диафрагм равен 0,6 и для сопел 0,99 независимо от значения m . Средняя квадратичная относительная погрешность этих коэффициентов составляет соответственно 1,5 и 1%. Наименьшее допустимое число $Re = 55 \cdot 10^3$ (независимо от значения m).

Отбор давлений осуществляется в пространстве, откуда вещество втекает в трубопровод, и непосредственно за сужающим устройством.

При измерениях на выходе из трубопровода в пространстве, куда втекает вещество, не должно быть препятствий на расстоянии $10D$ по оси трубы и $5D$ — перпендикулярно этой оси. Отбор давле-

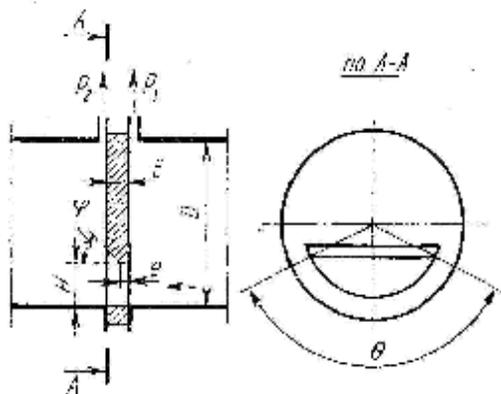


Рис. 7.14. Схема сегментной диафрагмы

ний при этом осуществляют непосредственно до сужающего устройства и в пространстве, куда втекает вещество.

При истечении газа из трубы в газовый объем можно использовать стандартные диафрагмы с таким же α , что и при установке внутри трубопровода, а также сопло с α , уменьшенным на 5%. При истечении жидкости в газ во избежание отрыва струи от стенки сопла в его цилиндрической части применяются стандартные диафрагмы.

Для измерения расхода в трубопроводах с внутренним диаметром менее 50 мм в [18] рекомендуется использовать стандартные сужающие устройства. Применение этих сужающих устройств возможно при условии, что предельные числа Рейнольдса находятся в диапазоне от $Re_{\min \text{ пр}} = 22 \cdot 10^3$ — $3 \cdot 10^5$ до $Re_{\max \text{ пр}} = 10^7$, в то время как для трубопроводов с $D = 50$ мм значение $Re_{\min \text{ пр}}$ меньше.

Для указанного диапазона чисел Рейнольдса в трубопроводах с диаметром $D = 14 \div 50$ мм и диаметром стандартной диафрагмы $d = 7 \div 40$ мм при $m = 0,05 \div 0,64$ в [18] приводятся формулы для определения коэффициента расхода и его среднеквадратической погрешности.

Износоустойчивые диафрагмы. Износоустойчивая диафрагма представляет собой, по существу, стандартную диафрагму, у которой на входной кромке снята фаска под углом $(45 \pm 5)^\circ$.

В последнее время взамен стандартных рекомендуется применять износоустойчивые диафрагмы. Это вызвано тем, что стандартные диафрагмы обладают тем существенным недостатком, что в процессе эксплуатации их острая входная кромка неизбежно притупляется под влиянием абразивного действия потока и это приводит к значительным погрешностям при измерении расхода. Износоустойчивые диафрагмы сохраняют свой профиль при длительной эксплуатации. Однако износоустойчивые диафрагмы имеют предельное минимальное число Рейнольдса примерно на порядок выше, чем стандартные диафрагмы. Коэффициент расхода α износоустойчивых диафрагм сохраняет свое постоянное значение в диапазоне чисел Рейнольдса от $Re_{\min \text{ пр}} = 2 \cdot 10^4 \div 3 \cdot 10^6$ до $Re_{\max \text{ пр}} = 10^7$ для $m = 0,05 \div 0,70$. Формулы для определения коэффициента расхода этих диафрагм приведены в [18]. Среднеквадратическая относительная погрешность износоустойчивых диафрагм $\sigma_\alpha = 0,2\%$ при $m \leq 0,04$. Износоустойчивые диафрагмы могут быть применены в трубопроводах с диаметром $D = 30,0 \div 1000,0$ мм при диаметре сужающего устройства $d = 16,0 \div 800,0$ мм.

§ 7.5. Расходомеры обтекания

Расходомеры обтекания относятся к большой группе расходомеров, называемых также расходомерами постоянного перепада давления. В этих расходомерах обтекаемое тело (поплавок, поршень, клапан, поворачивающаяся пластинка, шарик и др.) воспринимает со стороны набегающего потока силовое воздействие, которое при

возрастании расхода увеличивается и перемещает обтекаемое тело, в результате чего перемещающая сила уменьшается и вновь уравнивается противодействующей силой. В качестве противодействующей силы служит вес обтекаемого тела при движении потока вертикально снизу вверх или сила противодействующей пружины в случае произвольного направления потока.

Выходным сигналом рассматриваемых преобразователей расхода служит перемещение обтекаемого тела.

На рис. 7.15 приведены принципиальные схемы преобразовательных элементов расходомеров обтекания, получившие наибольшее распространение.

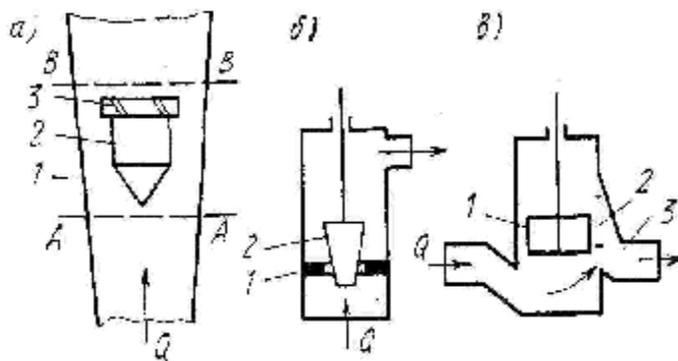


Рис. 7.15. Схемы преобразовательных элементов расходомеров обтекания

В соответствии со схемой рис. 7.15, а в конической трубке 1 размещен поплавок 2, при подъеме которого вверх под действием возросшего потока увеличивается площадь проходного кольца между поплавком и стенкой конической трубки, что приводит к уменьшению силы, создаваемой потоком, действующей на поплавок.

Аналогично увеличивается кольцевое сечение между коническим клапаном 2 и цилиндрическим седлом 1 (рис. 7.15, б).

В схеме рис. 7.15, в при подъеме поршня 1 увеличивается площадь выходного бокового отверстия 3 в стенке цилиндра 2.

Рассмотрим подробнее принцип работы преобразователя расходомера с поплавком (рис. 7.15, а). Во избежание трения и удара поплавок о стенку трубки в его верхнем ободе 3 выполнены наклоненные к вертикали прорези. Вещество, протекая через прорези, придает поплавку вращение, и он центрируется в середине потока. При равновесии сил, действующих на поплавок, он устанавливается на высоте, соответствующей измеряемому значению расхода.

На нижнюю часть поплавка снизу вверх действует сила $S_{\text{п}} = P_{\text{п}}f$ и сила трения $S_{\text{т}} = kW_{\text{к}}^n f_{\sigma}$ потока о боковую поверхность f_{σ} поплавка.

В последних формулах f — площадь наибольшего поперечного сечения поплавка; $P_{\text{п}}$ — полное давление потока; k — коэффициент сопротивления, зависящий от степени шероховатости поплавка и числа Рейнольдса; $W_{\text{к}}$ — средняя скорость потока в кольцевом пространстве; n — показатель степени, зависящий от $W_{\text{к}}$.

На поплавок сверху вниз действует сила $S_{\text{с}}$ статического давления P_2 непосредственно за поплавком: $S_{\text{с}} = P_2 f$, а также сила веса поплавка $G_{\text{п}} = V\rho_{\text{п}}g$ (V — объем поплавка; $\rho_{\text{п}}$ — плотность материала поплавка; g — ускорение свободного падения).

Таким образом, уравнение равновесия поплавка

$$P_{пf} + kW_{к}^n f_{\sigma} = P_2 f + V\rho_{п}g, \quad (7.41)$$

отсюда разность давлений, действующих на поплавок,

$$P_{п} - P_2 = V\rho_{п}g/f - kW_{к}^n f_{\sigma}/f. \quad (7.42)$$

В уравнениях (7.41) и (7.42) архимедова сила, действующая на поплавок, уже учтена в разности давлений, действующих на поплавок.

В первом приближении можно принять, что $W_{к}$ при изменении расхода жидкостей и газов не изменяется (увеличение расхода приводит к увеличению площади кольцевого канала), тогда правая часть выражения (7.42) будет постоянной: $P_{п} - P_2 = \text{const}$, благодаря чему расходомеры обтекания называют также расходомерами постоянного перепада давления.

В уравнении (7.42) полное давление потока $P_{п}$, действующее на поплавок снизу, является суммой двух давлений: $P_{п} = P_{д} + P_1$, где $P_{д} = \omega\rho W_1^2/2$ — динамическое давление (ω — коэффициент сопротивления поплавка, зависящей от его конфигурации; ρ — плотность вещества потока; W_1 — средняя скорость потока в сечении $A-A$); P_1 — статическое давление.

С учетом сказанного уравнение (7.42) представим в виде

$$P_1 - P_2 = V\rho_{п}g/f - kW_{к}^n f_{\sigma}/f - \omega\rho W_1^2/2. \quad (7.43)$$

Из (7.43) следует, что разность статических давлений ($P_1 - P_2$) по обе стороны поплавка не является постоянной, а с увеличением расхода ввиду увеличения скорости W_1 и соответственно динамического давления на поплавок уменьшается.

Для вывода уравнения расхода выделим сечение $A-A$, начиная с которого сказывается возмущающее действие поплавка на поток, и сечение $B-B$, в самом узком месте струи после прохода ее через кольцевое отверстие.

Уравнение Бернулли, записанное для указанных сечений, имеет вид

$$\frac{P_1^r}{\rho g} + \frac{k_1 W_1^2}{2g} + H_1 = \frac{P_2^r}{\rho g} + \frac{k_2 W_2^2}{2g} + H_2 + \xi \frac{W_2^2}{2g}; \quad (7.44)$$

здесь P_1 и P_2 — среднее абсолютное статическое давление в сечениях $A-A$ и $B-B$; W_1 и W_2 — средняя скорость потока в сечениях $A-A$ и $B-B$; k_1 и k_2 — коэффициенты неравномерности распределения скорости в сечениях $A-A$ и $B-B$; H_1 и H_2 — высота сечений $A-A$ и $B-B$ над некоторой нулевой отметкой; ξ — коэффициент потери энергии на участке между сечениями $A-A$ и $B-B$.

Уравнение сплошности для несжимаемой жидкости в сечениях $A-A$ и $B-B$ составит

$$Q = W_1 F_1 = W_2 F_2 = W_2 \mu F_{к}, \quad (7.45)$$

где Q — объемный расход жидкости; F_1 и F_2 — площадь потока в сечениях $A-A$ и $B-B$; F_K — площадь кольцевого отверстия между верхней частью поплавка и конусной трубкой; $\mu = F_2/F_K$ — коэффициент сужения струи.

Решая уравнения (7.44) и (7.45) совместно, имеем

$$\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} - 2gl = \frac{Q^2}{\psi \mu^2 F_K^2} \left[k_2 + \xi + k_1 \mu^2 \left(\frac{F_K}{F_1} \right)^2 \right], \quad (7.46)$$

где l — длина поплавка; $l = (H_2 - H_1)/\psi \approx H_2 - H_1$; $\psi = (P_1 - P_2)/(P_1 - P_2)$

Подставляя в уравнение (7.46) значение $(P_1 - P_2)$ из (7.44), получим

$$Q = \alpha F_K \sqrt{\frac{2gV(\rho_{\Pi} - \rho)}{\rho f}}, \quad (7.47)$$

где

$$\alpha = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{k_2 + \xi + k_1 \mu^2 (F_K/F_1)}} \sqrt{\frac{g(V\rho_{\Pi} - fl\rho) - kW_k^n f_{\sigma} - \omega f \rho W_1^2/2}{gV(\rho_{\Pi} - \rho)}}. \quad (7.48)$$

Из (7.47) следует, что если коэффициент расхода α принять постоянным, то расход вещества может быть определен по значению площади кольцевого отверстия F_K . Учитывая, что F_K — функция положения поплавка, значение высоты его подъема служит мерой расхода.

Как следует из выражения (7.48), α зависит от многих переменных, которые обычно не могут быть найдены аналитически, что и делает невозможным определение α теоретическим путем. В связи с этим ротаметры подвергают градуировке, используя в качестве градуировочной среды воду или воздух. Пересчет показаний ротаметров при измерении других сред производят с учетом их плотности и вязкости по методике, приводимой в инструкциях по монтажу и наладке ротаметров.

Расходомеры обтекания, применяемые для измерения расхода жидкостей и газов, имеют несколько разновидностей. Наиболее распространенные из них приведены на рис. 7.16.

В ротаметрах со стеклянной конической трубкой 1 (рис. 7.16, а), предназначенных для измерения газов или прозрачных жидкостей, шкала 4 нанесена непосредственно на внешней поверхности стекла. Указателем служит верхняя горизонтальная плоскость вращающегося поплавка 2. На нижнем патрубке имеется седло, на которое опускается поплавок при нулевом расходе вещества. На верхнем патрубке имеется ограничитель хода поплавка 3.

Для измерения расхода непрозрачных жидкостей (рис. 7.16, б) применяют цилиндрическую стеклянную трубку 3 и цилиндрический поплавок 1 с отверстием посередине, через которое проходит неподвижный стержень 2 конического сечения. При перемещении

вдоль трубки 1 поплавков одновременно вращается, а кольцевое переменное отверстие для потока создается между поплавком и стержнем 2. Ротаметры со стеклянными трубками изготавливают на максимальное давление 0,6 МПа.

Для измерения расхода газов и жидкостей на технологических потоках применяются ротаметры, снабженные передающими преобразовательными элементами с электрическим

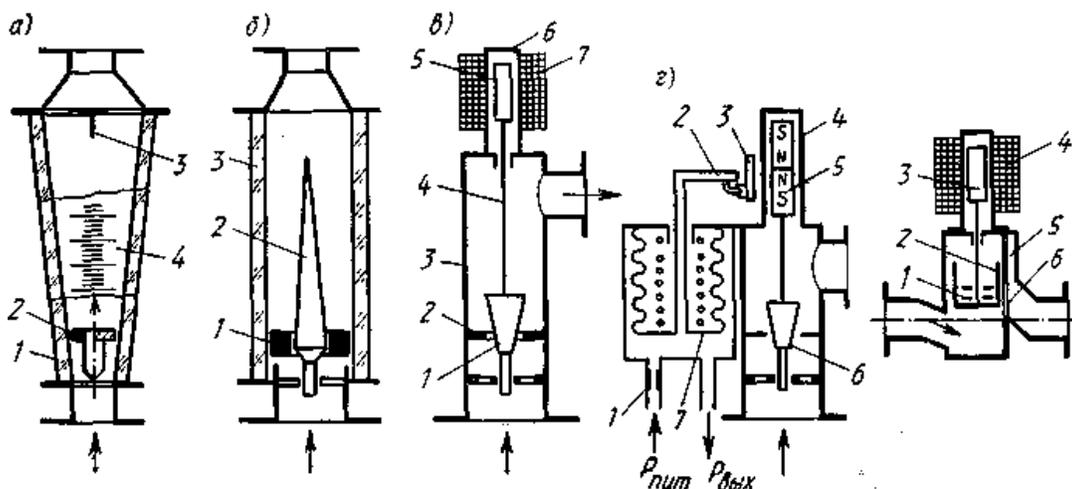


Рис. 7.16. Схемы расходомеров обтекания

(рис. 7.16, в) или пневматическим (рис. 7.16, г) выходным сигналом.

Ротаметр, показанный на рис. 7.16, в, состоит из металлического корпуса 3, внутри которого при изменении расхода перемещается обтекаемое тело — клапан 1 конического профиля. Между рабочей поверхностью клапана 1 и кольцевой диафрагмой 2 создается переменное проходное отверстие. С клапаном 1 с помощью штока 4 связан сердечник 5 дифференциально-трансформаторного преобразовательного элемента 7, катушка которого надета на трубку 6 из немагнитной стали. Класс точности этих ротаметров в комплекте со вторичным прибором — 2,5.

Ротаметр, представленный на рис. 7.16, г, отличается от ротаметра на рис. 7.16, в лишь передающим преобразовательным элементом.

В ротаметре, представленном на рис. 7.16, г, сердечник 5, связанный с клапаном 6, выполнен из двух магнитов, обращенных друг к другу одноименными полюсами. Снаружи немагнитной трубки 4 на шарнире расположен магнит 3, являющийся одновременно заслонкой пневматического сопла 2. Внутренний 5 и наружный 3 магниты устанавливаются разноименными полюсами один против другого и образуют уравновешенную систему. Поэтому незначительное перемещение сердечника вверх (при увеличении расхода) вызывает поворот магнита 3, который прикрывает сопло 2, и давление

$P_{\text{вых}}$ между пневмодросселем 1 и соплом 2 увеличивается. Это приводит к сжатию сильфона отрицательной обратной связи 7 и к перемещению сопла 2 с магнитом 3 вверх. При перемещении магнит 3 несколько отходит от сопла 2. Равновесие системы наступает тогда, когда магнит 3 займет по высоте такое же положение, какое занимает сердечник 5. Таким образом, внешний магнит все время следит за положением внутреннего магнита.

Ротамеры с выходным пневматическим сигналом 0,02—0,1 МПа выпускаются классов точности 1,5 и 2,5.

В поршневом расходомере постоянного перепада давления (рис. 7.16, д) масса поршня 2 с грузами 1 и штока с сердечником 3 уравнивается перепадом давления до и после выходного прямоугольного отверстия б в боковой стенке цилиндра. Передающий преобразователь здесь выполнен в виде сердечника 3 из мягкой стали, перемещающегося внутри немагнитной трубки, на которой установлена индукционная катушка 4.

Чем больше расход вещества, тем выше поднимается поршень и приоткрывается проходное сечение в боковой стенке. Давление за отверстием б через канал 5 передается в верхнюю часть поршня. Таким образом, перепад давления на отверстии и на поршне один и тот же. Этот перепад создает подъемную силу поршня, уравниваемую весом подвижной системы. Изменяя вес подвижной системы с помощью сменных грузов 1, изменяют предел измерения расходомера.

В поршневом расходомере сила трения потока о поршень и динамическое давление направлены перпендикулярно подъемной силе поршня, т. е. вес поршня уравнивается только перепадом давления на проходном отверстии. Поэтому перемещение поршня происходит при изменении расхода и мало зависит от вязкости потока.

При измерении расхода веществ, обладающих большой вязкостью, поршневые расходомеры снабжаются паровым подогревателем. Поршневые расходомеры имеют класс точности 2,5.

§ 7.6. Расходомеры переменного уровня

Принцип действия расходомеров переменного уровня основан на зависимости высоты уровня жидкости в сосуде от расхода непрерывно поступающей и вытекающей из сосуда жидкости. Вытекание жидкости из сосуда происходит через отверстие в дне или в боковой стенке. Сосуды для приема жидкости выполняют цилиндрическими или прямоугольными.

В расходомерах с полностью затопленными отверстиями истечения последние имеют круглую форму и располагаются либо в дне, либо в боковой стенке. В расходомерах с частично заполненными отверстиями истечения последние выполнены в виде щели в боковой стенке. Расходомеры переменного уровня могут быть использованы для измерения расхода газонасыщенных нефтей, сточных вод и загрязненных жидкостей, в том числе содержащих взвеси.

В расходомере переменного уровня с затопленным отверстием (рис. 7.17, а) измеряемый поток поступает в сосуд 3 через патрубок 4. На дне сосуда в качестве отверстия истечения обычно устанавливается нормальная диафрагма 1. Для предохранения диафрагмы от загрязнения и успокоения потока жидкости внутри сосуда установлены перегородки 5.

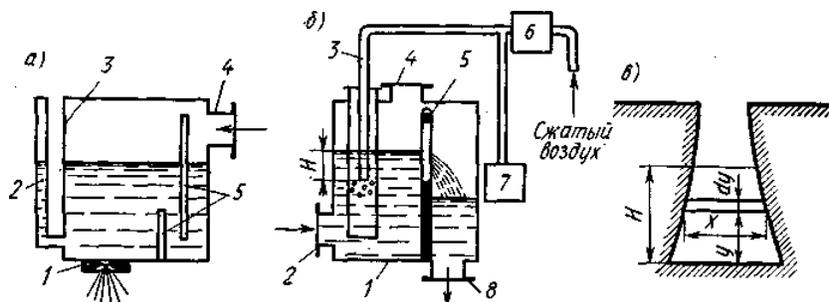


Рис. 7.17. Схемы расходомеров переменного уровня

Уровень в сосуде определяется по водонервному стеклу 2. Объемный расход вещества Q плотностью ρ , вытекающего через диафрагму сечением E_0 , представим в виде

$$Q = \alpha F_0 \sqrt{2(P_1 - P_2)/\rho},$$

где α — коэффициент расхода; $P_1 - P_2$ — перепад давления на диафрагме.

Так как истечение происходит в атмосферу, то $P_1 - P_2 = H\rho g$ и

$$Q = \alpha F_0 \sqrt{2gH}, \quad (7.49)$$

Отсюда следует, что объемный расход из сосуда не зависит от плотности жидкости и определяется уровнем жидкости H в сосуде. Если диаметр диафрагмы $d \geq 50$ мм, $H \geq 800$ мм и $Re_d \geq 10^5$, то $\alpha = 0,598$, т. е. как для стандартной диафрагмы при $m = 0,05$.

При установке диафрагмы в боковой стенке расчетная формула (7.49) остается прежней, а уровень H должен отсчитываться от центра диафрагмы.

Расходомер с щелевым отверстием истечения (рис. 7.17, б) состоит из сосуда 1, в который через патрубок 2 поступает измеряемая жидкость. Внутри сосуда размещена перегородка, снабженная щитом с профилированной сливной щелью 5, через которую происходит истечение жидкости из левой части сосуда в правую с выходным патрубком 8. Для измерения уровня H над нижней кромкой щели в защитном чехле установлена пьезометрическая трубка 3, через которую непрерывно продувается воздух, предварительно прошедший систему подготовки газа 6. Давление воздуха в трубке 3, измеряемое дифманометром 7, служит мерой уровня H (см. гл.

8). Зависимость объемного расхода Q жидкости от уровня H определяется формой отверстия истечения (рис. 7.17, б). Расход dQ через элементарную площадку шириной x и высотой dy для щели произвольной формы в соответствии с (7.49) запишем в виде

$$dQ = \alpha x dy \sqrt{2g(H-y)}.$$

Полный расход составит

$$Q = \sqrt{2g} \int_0^H \alpha x \sqrt{H-y} dy. \quad (7.50)$$

Чтобы проинтегрировать уравнение (7.50), необходимо определить зависимость между x и y . Для этого задаются либо формой щели (например, треугольной, логарифмической или др.), либо желаемой зависимостью между Q и H .

Зададимся линейной зависимостью

$$Q = kH, \quad (7.51)$$

где k — коэффициент, определяемый из условия $k = Q_{\max}/H_{\max}$. Подставляя значение Q из уравнения (7.51) в (7.50), имеем

$$\int_0^H \alpha x \sqrt{H-y} dy = \frac{k}{\sqrt{2g}} H. \quad (7.52)$$

Желаемая зависимость (7.51) оказывается возможной при условии [14]:

$$x = c/\sqrt{y}, \quad (7.53)$$

где c — постоянная величина; $c = \sqrt{2k}/(\alpha\pi\sqrt{g})$.

Действительно, подставляя значение x из (7.53) в (7.50) и интегрируя его, получим

$$Q = \frac{2k}{\pi} \int_0^H \frac{\sqrt{H-y}}{y} dy = kH, \quad (7.54)$$

что совпадает с заданной зависимостью (7.51), и, таким образом, профиль щели должен описываться уравнением (7.53) гиперболического типа. Из выражения (7.54) следует, что у щелевых расходомеров для измерения объемного расхода необходимо измерять Уровень жидкости H , а для получения массового расхода — давление гидростатического столба $H\rho g$. Коэффициент расхода для щелевых расходомеров определяют путем индивидуальной градуировки, а ориентировочное его значение может быть принято равным 0,6.

§ 7.7. Электромагнитные расходомеры

Принцип действия электромагнитных расходомеров основан на законе электромагнитной индукции — законе Фарадея, согласно которому в проводнике, пересекающем магнитные силовые линии,

индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения проводника. Если использовать в качестве проводника поток электропроводящей жидкости, текущей между полюсами магнита, и измерить наведенную в жидкости ЭДС, то можно определить скорость потока или объемный расход жидкости. Схема электромагнитного расходомера показана на рис. 7.18. Между полюсами магнита *N* и *S*, перпендикулярно направлению магнитных силовых линий, располагается отрезок металлической немагнитной трубы *3*, которая устанавливается между фланцами трубопровода с измеряемым потоком жидкости. Внутренняя поверхность

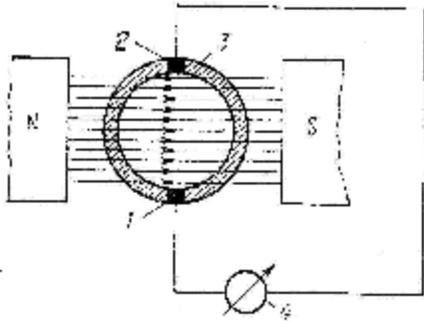


Рис. 7.18. Схема электромагнитного расходомера

трубы *3* покрыта электроизоляционным материалом (эмаль, стеклопластик, резина и др.). В плоскости, перпендикулярной магнитным силовым линиям, диаметрально противоположно установлены в стенке трубы два электрода *1* и *2*. Электроды с помощью соединительных проводников подключены к измерительному прибору *4* (милливольтметру или потенциометру).

ЭДС, индуцируемая в постоянном магнитном поле:

$$E = BWD = \frac{4B}{\pi D} Q, \quad (7.55)$$

где *B* — магнитная индукция; *W* — средняя скорость потока жидкости; *D* — внутренний диаметр трубопровода; *Q* — объемный расход жидкости.

Из уравнения (7.55) следует, что при *B* = const измеряемая ЭДС линейно зависит от объемного расхода жидкости. Электромагнитные расходомеры могут быть использованы для жидкостей, имеющих электропроводность не менее 10^{-5} — 10^{-6} См/м (что несколько меньше электропроводности питьевой воды).

Основным и существенным недостатком электромагнитных расходомеров с постоянным магнитным полем является возникновение на электродах гальванической ЭДС и ЭДС поляризации, уменьшающих полезно индуцируемую ЭДС и приводящих к значительным погрешностям измерения. Паразитная ЭДС поляризации практически может быть устранена при использовании в качестве магнитов электромагнитов, питаемых переменным током. В этом случае индуцируемая ЭДС

$$E = 4QB \max \sin 2\pi f t / (\pi D), \quad (7.56)$$

где B_{\max} — амплитудное значение магнитной индукции; *f* — частота переменного тока.

Однако использование переменного магнитного поля создает ряд эффектов, искажающих полезный сигнал.

К числу помех относится трансформаторная помеха, достигающая 20—30% полезного сигнала, возникающая из-за ЭДС, наводимой в цепи, образуемой жидкостью в трубопроводе, электродами, соединительными проводами и вторичными приборами. Источником наводимой ЭДС является первичная обмотка питания электромагнитов. Для компенсации трансформаторной помехи принимают ряд мер [3, 14]:

1. Включают два преобразователя расхода по дифференциальной схеме так, чтобы полезные ЭДС складывались, а паразитные вычитались.

2. Используют компенсаторы с автоматическим уравниванием двух составляющих напряжения, различающихся по фазе.

3. В цепь усилителя включают фазочувствительный детектор, подавляющий паразитную ЭДС, сдвинутую на 90° относительно полезной.

4. Включают в цепь электродов катушку, расположенную в рабочем магнитном поле и поворачивающуюся до момента компенсации наводимой в ней паразитной ЭДС.

Наряду с трансформаторной помехой имеет место помеха от емкостного эффекта, возникающего из-за большой разности потенциалов между катушкой питания электромагнитов и электродами и паразитной емкости между ними (соединительные провода и т. п.). Для устранения емкостного эффекта необходима тщательная экранировка. Кроме указанных помех имеются помехи от изменения частоты тока, питающего катушки электромагнитов, влияния температуры окружающей среды, внешних наводок.

Несмотря на наличие отмеченных помех и трудность их устранения, в промышленных условиях нашли применение главным образом электромагнитные расходомеры с переменным магнитным полем.

Электромагнитные расходомеры обладают рядом преимуществ. Прежде всего при измерении объемного расхода жидкости нет необходимости в измерении плотности потока. Кроме того, на показания расходомеров не влияют взвешенные в жидкости частицы и пузырьки газа, а также параметры измеряемого потока жидкости (давление, температура, вязкость, плотность и т. п.), если они не изменяют ее электропроводности.

Электромагнитные расходомеры позволяют проводить измерение без потери давления, а также проводить измерения в стерильных объектах.

Электромагнитные расходомеры практически безынерционны и поэтому могут быть использованы при измерении быстро меняющихся потоков.

Выпускаемые в настоящее время электромагнитные расходомеры позволяют измерять расход в широком диапазоне $1\text{—}2500\text{ м}^3/\text{ч}$. Для трубопроводов с диаметром $10\text{—}1000\text{ мм}$ при линейной скоро-

сти движения 0,6—10 м/с. Классы точности расходомеров 1,0—2,5 (при ежедневной корректировке нуля прибора). Электромагнитные расходомеры непригодны для измерения расхода газов и жидкостей с электропроводимостью менее 10^{-5} — 10^{-3} См/м, например нефтепродуктов, спиртов и т. д.

§ 7.8. Тепловые расходомеры

Принцип действия тепловых расходомеров основан на нагреве потока вещества и измерении разности температур до и после нагревателя (калориметрические расходомеры) или на измерении температуры нагретого тела, помещенного в поток (термоанемометрические расходомеры). Последние не имеют самостоятельного применения в технологических измерениях.

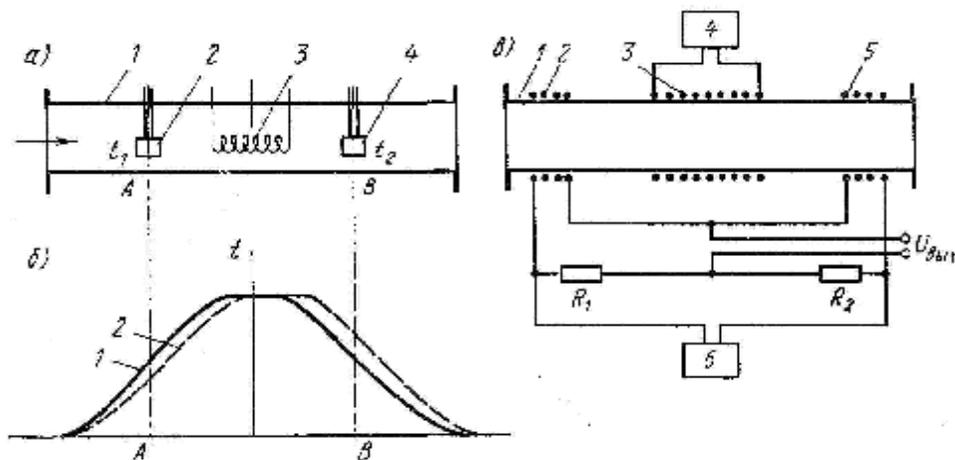


Рис. 7.19. Схема калориметрического расходомера

Схема калориметрического расходомера показана на рис. 7.19, а. В трубопроводе 1 установлен нагреватель потока 3, на равных расстояниях от центра нагревателя — термопреобразователи 2 и 4 (при этом нагрев их от лучеиспускания одинаков), измеряющие температуру t_1 потока до и после нагрева t_2 .

Кривые распределения температуры среды до и после нагревателя при его постоянной выделяемой тепловой мощности приведены на рис. 7.19, б. Для неподвижной среды распределение температуры в ней (кривая 1) симметрично относительно оси нагревателя и поэтому разность температур $\Delta t = t_1 - t_2 = 0$. При некоторой малой скорости потока распределение температуры (кривая 2) несимметрично и несколько смещается вправо. В сечении А-А температура t_1 падает вследствие поступления холодного вещества, а в сечении В-В температура t_2 или несколько возрастает, или же не меняется,

вследствие чего при малых расходах Δt 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. будет уменьшаться Δt . Таким образом, при больших расходах разность температур Δt обратно пропорциональна расходу.

Исходя из сказанного, можно заключить, что зависимость Δt от массового расхода имеет две ветви — восходящую при малых расходах и нисходящую — при больших. Обе эти ветви в определенных пределах измерения линейны [14], и, естественно, надо работать на одной из ветвей. Обычно работают на нисходящей ветви, где Δt обратно пропорциональна G .

Зависимость между массовым расходом G и разностью температур Δt при допущении, что нет потерь теплоты в окружающую среду (что достигается изоляцией трубы), определяется уравнением теплового баланса вида

$$N = kGc_p\Delta t, \quad (7.57)$$

отсюда

$$G = N / (kc_p\Delta t), \quad (7.58)$$

где N — мощность нагревателя; k — поправочный множитель на неравномерность распределения температур по сечению трубопровода; c_p — теплоемкость вещества при температуре $(t_1 + t_2)/2$.

Из выражения (7.58) следует, что измерение массового расхода может быть осуществлено двумя способами: 1) по значению подаваемой к нагревателю мощности N , обеспечивающей постоянную заданную разность температур Δt ; 2) по значению разности Δt при постоянной N .

В соответствии с первым способом расходомер работает как регулятор температуры нагрева потока. При изменении Δt автоматически изменяется мощность N до тех пор, пока Δt не достигнет заданного значения. Массовый расход при этом определяется по шкале ваттметра в цепи нагревателя.

Для уменьшения расходуемой мощности обычно ограничивают заданное значение Δt в пределах 1—3° С.

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.

В качестве преобразователей температуры в калориметрических расходомерах могут быть использованы различные термоприемники (термоэлектрические преобразователи, термопреобразователи сопротивления и др.). Термопреобразователи сопротивления обладают здесь тем преимуществом, что их можно выполнять в виде равномерной сетки, перекрывающей все сечение, и таким образом измерять среднюю по сечению температуру.

Калориметрические расходомеры, градуируемые индивидуально, имеют классы точности 0,5—1. Калориметрические расходомеры в основном применяют для измерения малых расходов чистых газов. Для измерения расхода жидкостей калориметрические расходомеры не нашли практического применения из-за большой потребляемой мощности. Основное и важное преимущество калориметрических расходомеров состоит в том, что они обеспечивают измерение массового расхода газа без измерения его параметров состояния (давление, температура, плотность).

Поиски повышения эксплуатационной надежности калориметрических расходомеров привели к созданию тепловых расходомеров, у которых нагреватель и термопреобразователи размещают на наружной стенке трубы, и передача теплоты к потоку осуществляется через стенку трубы и далее — через пограничный слой. В зависимости от относительного расположения термопреобразователей друг к другу и к нагревателю различают расходомеры теплового пограничного слоя и квазикалориметрические. Расходомеры теплового пограничного слоя применяют для трубопроводов с диаметром 50—100 мм и выше. Эти расходомеры основаны на измерении разности температур, образующейся с обеих сторон пограничного слоя. При реализации этого метода оказывается практически достаточно вместо непосредственного измерения разности температур пограничного слоя, зависящей от расхода вещества в трубе, измерять эквивалентную разность. Для этого первый по ходу потока термопреобразователь располагают на внешней стороне трубы на участке, изолированном от ее нагретой части, т. е. принимая, что измеряется температура поступающего потока, а второй термопреобразователь — непосредственно на трубе за нагревателем. Градуировочные кривые у расходомеров, измеряющих разность температур пограничного слоя, в отличие от калориметрических, не имеют двух ветвей. Отмеченная особенность является их преимуществом. К недостаткам следует отнести зависимость показаний этих приборов от теплопроводности, теплоемкости и вязкости потока, а также от изменения параметров состояния.

Еще одной разновидностью тепловых расходомеров, у которых нагреватель и термопреобразователи расположены на внешней стороне трубопровода (рис. 7.19, в), являются так называемые квазикалориметрические расходомеры [14]. В квазикалориметрических расходомерах (рис. 7.19, в) в отличие от тепловых расходомеров пограничного слоя не применяются никакие меры для того, чтобы изолировать первый по ходу потока термопреобразователь 2 от теплового воздействия нагревателя 3. При малых диаметрах труб (от 1,5 до 25 мм), для которых в основном и применяются эти расходомеры, прогревается не только пограничный слой, но и в значительной мере весь поток, поэтому здесь измеряется не разность температур пограничного слоя, а разность, очень близкая к разности температур потока до и после нагревателя.

Трубу 1 из материала с большой теплопроводностью (обычно ни-

кель, латунь) покрывают смоляным лаком с целью электрической изоляции от наматываемых на нее нагревателя 3 и термопреобразователей сопротивления 2 и 5. Последние вместе с постоянными сопротивлениями R_1 и R_2 образуют неуравновешенный электрический мост. Измеряемое в диагонали моста прибором 6 напряжение пропорционально разности температур, и шкала этого прибора градуируется в единицах массового расхода вещества. Для устранения влияния внешней среды и стабилизации температуры весь измерительный участок трубы теплоизолируется и, кроме того, его заключают в массивный медный кожух. При диаметрах труб в пределах 1,5—50 мм мощность нагревателя, питаемого от источника 4, составляет 0,1—100 Вт. Длина намотки на трубе 10—100 мм. Классы точности расходомеров с внешним расположением нагревателя 1,5—3. Основным их недостатком является большая инерционность.

ГЛАВА 8

ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ

§ 8.1. Общие сведения

Уровнем называют высоту заполнения технологического аппарата рабочей средой — жидкостью или сыпучим телом. Уровень рабочей среды является технологическим параметром, информация о котором необходима для контроля режима работы технологического аппарата, а в ряде случаев для управления производственным процессом.

Путем измерения уровня можно получать информацию о массе жидкости в резервуарах. Подобная информация широко используется для проведения товароучетных операций и для управления производственным процессом. Уровень измеряют в единицах длины. Средства измерений уровня называют уровнемерами.

Различают уровнемеры, предназначенные для измерения уровня рабочей среды; измерений массы жидкости в технологическом аппарате; сигнализации предельных значений уровня рабочей среды— сигнализаторы уровня.

По диапазону измерения различают уровнемеры широкого и узкого диапазонов. Уровнемеры широкого диапазона (с пределами измерений 0,5—20 м) предназначены для проведения товароучетных операций, а уровнемеры узкого диапазона [пределы измерений $(0 \div \pm 100)$ мм или $(0 \div \pm 450)$ мм] обычно используются в системах автоматического регулирования.

В настоящее время измерение уровня во многих отраслях промышленности осуществляют различными по принципу действия уровнемерами, из которых распространение получили поплавковые, буйковые, гидростатические, электрические, ультразвуковые и радиоизотопные. Применяются и визуальные средства измерений.

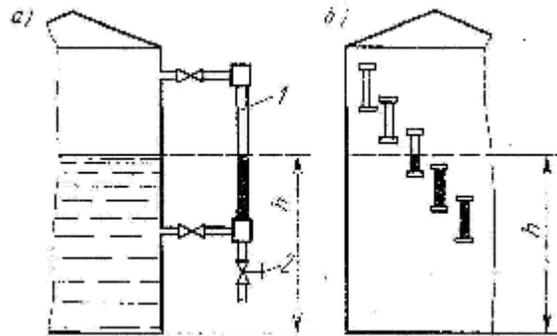
§ 8.2. Визуальные средства измерений уровня

К визуальным средствам измерений уровня относятся мерные линейки, рейки, рулетки с лотами (цилиндрическими стержнями) и уровнемерные стекла.

В производственной практике широкое применение получили уровнемерные стекла. Измерение уровня с помощью уровнемерных стекол (рис. 8.1, а) основано на законе сообщающихся сосудов. Указательное стекло *1* с помощью арматуры соединяют с нижней

и верхней частями емкости. Наблюдая за положением мениска жидкости в трубке /, судят о положении уровня жидкости в емкости. Для исключения дополнительной погрешности, обусловленной различием температуры жидкости в резервуаре и в стеклянной трубке, перед измерением осуществляют промывку

уровнемерных стекол. Для этого предусмотрен вентиль 2. Арматура уровнемерных стекол оснащается предохранительными клапанами, обеспечивающими автоматическое прекрывание каналов, связывающих указательное стекло с техно-



логическим аппаратом при случайной поломке стекла. Из-за низкой механической прочности уровнемерные стекла обычно выполняют длиной не более 0,5 м. Поэтому для измерения уровня в резервуарах (рис. 8.1, б) устанавливается несколько уровнемерных стекол с тем расчетом, чтобы они перекрывали друг друга. Абсолютная погрешность измерения уровня уровнемерными стеклами $\pm (1—2)$ мм. При измерении возможны дополнительные погрешности, связанные с влиянием температуры окружающей среды. Уровнемерные стекла применяются до давлений 2,94 МПа и до температуры 300°С.

Рис. 8.1. Схема установки указательных стекол на технологических аппаратах

§ 8.3. Поплавковые средства измерений уровня

Среди существующих разновидностей уровнемеров поплавковые являются наиболее простыми. Получили распространение поплавковые уровнемеры узкого и широкого диапазонов. Поплавковые уровнемеры узкого диапазона (рис. 8.2) обычно представляют собой устройства, содержащие шарообразный поплавок диаметром 80— 200 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 / угловых перемещений в унифицированный электрический или пневматический сигналы. Уровнемеры узкого диапазона выпускаются двух типов: фланцевые (рис. 8.2, а) и камерные (рис. 8.2, б), отличающиеся способом их установки на технологических аппаратах. Минимальный диапазон измерений этих уровнемеров — $10 \div 0 \div 10$ мм, максимальный — 200—0—200 мм. Класс точности 1,5. Поплавковые уровнемеры широкого диапазона (рис. 8.2, в) представляют собой поплавок /, связанный с противо-

весом 4 гибким тросом 2. В нижней части противовеса укреплена стрелка, указывающая по шкале 3 значения уровня жидкости в резервуаре. При расчетах поплавковых уровнемеров подбирают такие конструктивные параметры поплавка, которые обеспечивают состояние равновесия системы «поплавок — противовес» только при определенной глубине погружения

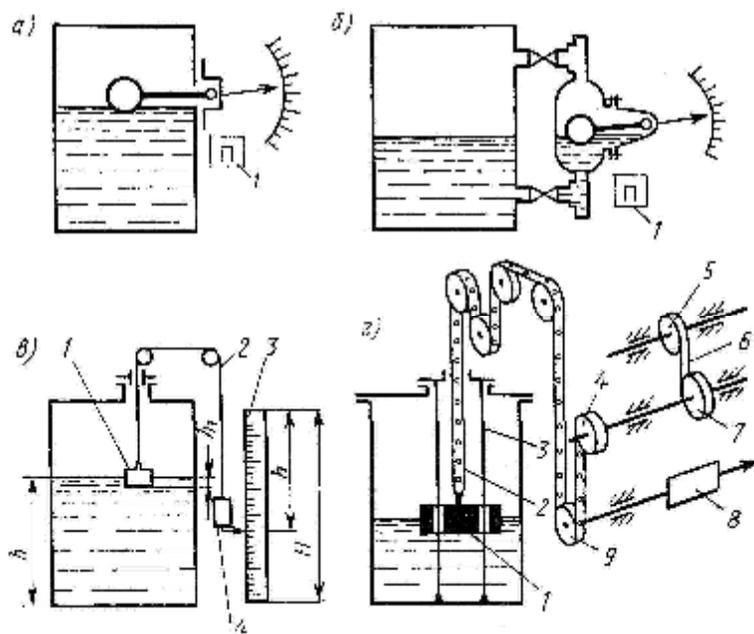


Рис. 8.2. Схемы поплавковых уровнемеров

поплавок. Если пренебречь силой тяжести троса и трением в роликах, состояние равновесия системы «поплавок — противовес» описывается уравнением

$$G_{\Gamma} = G_{\Pi} - Sh_1\rho_{\text{ж}}g, \quad (8.1)$$

где G_{Γ} , G_{Π} — силы тяжести противовеса и поплавка; S — площадь поплавка; h_1 — глубина погружения поплавка; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность жидкости.

Повышение уровня жидкости изменяет глубину погружения поплавка и на него действует дополнительная выталкивающая сила. В результате равенство (8.1) нарушается, и противовес опускается вниз до тех пор, пока глубина погружения поплавка не станет равной h_1 . При понижении уровня действующая на поплавок выталкивающая сила уменьшается, и поплавок начинает опускаться вниз до тех пор, пока глубина погружения поплавка не станет равной h_1 . Для передачи информации о значении уровня жидкости в резервуаре применяют сельсинные системы передачи. Обычно ось сельсина-

датчика кинематически связана с барабаном, вращение которого осуществляется в процессе перемещения троса, а ось сельсина-приемника— со счетным механизмом. В номенклатуру средств контроля уровня ГСП входит поплавковый уровнемер, предназначенный для измерения уровня нефтепродуктов в резервуаре. Уровнемер (рис. 8.2, з) представляет собой поплавок 1, подвешенный на перфорированной стальной (мерной) ленте 2. Для исключения горизонтальных перемещений поплавок предусмотрены направляющие струны 3. Отличительной особенностью уровнемера этого типа является то, что в нем осуществляется натяжение мерной ленты пружинным двигателем. Двигатель состоит из барабанов 5 и 6. Когда поплавок находится в крайнем верхнем положении, мерная лента 2 сматывается на барабан — накопитель 4. При понижении уровня жидкости сила тяжести поплавок преодолевает силы трения в подвижной системе и усилие, создаваемое пружинным двигателем. В результате поплавок перемещается вниз. Перемещение поплавок вниз сопровождается вращением барабана-накопителя 4 и сматыванием ленты 6 пружинного двигателя с барабана 5 на барабан 7. При перемещении поплавок вверх натяжение мерной ленты уменьшается и лента пружинного двигателя перематывается на барабан-накопитель 4. В процессе перемещения мерная лента вступает в зацепление со штырями мерного шкива 9, на оси которого укреплен счетный механизм 8, представляющий собой десятичный счетчик с наименьшей ценой деления 1 мм. Для передачи информации на расстояние к валу отсчетного устройства может быть подключен преобразователь угла поворота в электрический или пневматический унифицированные сигналы. Минимальный диапазон измерений 0—12 м, максимальный 0—20 м. Абсолютная погрешность измерения ± 4 и ± 10 мм.

§ 8.4. Буйковые средства измерений уровня

Средства измерений уровня этого вида входят в номенклатуру приборов ГСП.

В основу работы буйковых уровнемеров положено физическое явление, описываемое законом Архимеда. Чувствительным элементом в этих уровнемерах является цилиндрических боек, изготовленный из материала с плотностью, большей плотности жидкости. Боек находится в вертикальном положении и частично погружен в жидкость. При изменении уровня жидкости в аппарате масса буйка в жидкости изменяется пропорционально изменению уровня. Преобразование веса буйка в сигнал измерительной информации осуществляется с помощью унифицированных преобразователей «сила—давление» и «сила — ток». В соответствии с видом используемого преобразователя силы различают пневматические и электрические буйковые уровнемеры.

Схема буйкового пневматического уровнемера приведена на Рис. 8.3, а. Уровнемер работает следующим образом. Когда уро-

вень жидкости в аппарате равен начальному h_0 (в частном случае h_0 может быть равен 0), измерительный рычаг 2 находится в равновесии, так как момент M_1 создаваемый весом буйка G , уравновешивается моментом M_2 , создаваемым противовесом N .

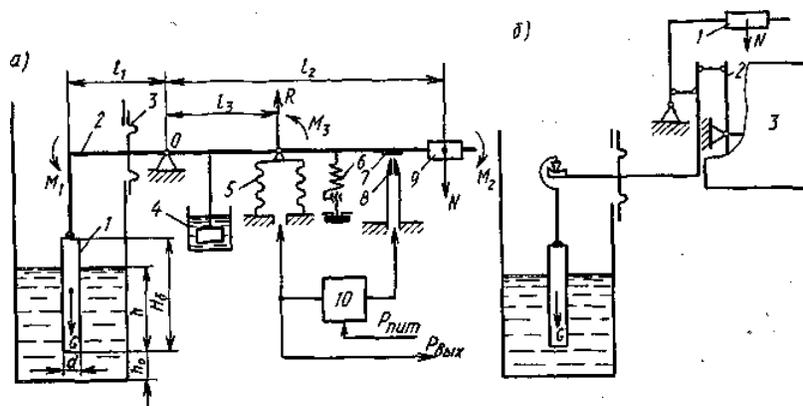


Рис. 8.3. Схемы буйковых пневматических уровнемеров

Когда уровень жидкости становится больше h_0 , часть буйка погружается в жидкость. Поэтому вес буйка уменьшается, а следовательно, уменьшается и момент M_1 создаваемый буйком на рычаге 2. Так как M_2 становится больше M_1 , рычаг 2 поворачивается вокруг точки O по часовой стрелке и прикрывает заслонкой 7 сопла 8. Поэтому давление в линии сопла увеличивается. Это давление поступает в пневматический усилитель 10, выходной сигнал которого является выходным сигналом уровнемера. Этот же сигнал одновременно посылается в сильфон отрицательной обратной связи 5. При действии давления $P_{\text{Вых}}$ возникает сила R , момент M_3 которой совпадает по направлению с моментом M_1 , т. е. действие силы R направлено на восстановление равновесия рычага 2. Движение измерительной системы преобразователя происходит до тех пор, пока сумма моментов всех сил, действующих на рычаг 2, не станет равной 0, т. е.

$$M_1 + M_3 - M_2 = 0, \quad (8.2)$$

Представляя моменты M_1 , M_2 , M_3 в виде произведений соответствующих сил и плеч, получим

$$Gl_1 + Rl_3 = Nl_2, \quad (8.3)$$

где G — вес буйка при погружении его в жидкость на глубину h ; l_1 , l_2 , l_3 — плечи действующих сил относительно точки O ; R — сила, развиваемая сильфоном 5; N — вес противовеса.

Силы G и R определяем из следующих выражений:

$$G = \frac{\pi d^2}{4} \rho g H_{\sigma} - \frac{\pi d^2}{4} \rho_{ж} g h = \frac{\pi d^2}{4} g (\rho H_{\sigma} - \rho_{ж} h), \quad (8.4)$$

$$R = f_{\text{эф}} P_{\text{ВЫХ}}, \quad (8.5)$$

где d и H_{σ} — диаметр и длина буйка (последняя определяет диапазон измерений уровнемера); ρ — плотность материала буйка; $\rho_{ж}$ — плотность жидкости; h — глубина погружения буйка в жидкость, т. е. текущее значение измеряемого уровня; $f_{\text{эф}}$ — эффективная площадь сильфона 5.

Подставляя выражения для сил G и R в равенство (8.3), получим

$$\frac{\pi d^2}{4} \rho g H_{\sigma} l_1 - \frac{\pi d^2}{4} \rho_{ж} g h l_1 + f_{\text{эф}} P_{\text{ВЫХ}} l_3 = N l_2. \quad (8.6)$$

В этом равенстве $\frac{\pi d^2}{4} \rho g H_{\sigma}$ — вес буйка в воздухе. Если выбрать произведение $N l_2$ равным $\frac{\pi d^2}{4} \rho g H_{\sigma} l_1$, чего можно достигнуть, изменяя, например, плечо l_2 , то

$$\frac{\pi d^2}{4} \rho_{ж} g h l_1 = f_{\text{эф}} P_{\text{ВЫХ}} l_3, \quad (8.7)$$

откуда

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_{ж} g l_1}{f_{\text{эф}} l_3} h = k h, \quad (8.8)$$

где $k = \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho_{ж} g l_1}{f_{\text{эф}} l_3}$ — коэффициент передачи уровнемера.

Выходной сигнал $P_{\text{ВЫХ}}$ уровнемера линейно связан со значением измеряемого уровня h . Выражение $\frac{\pi d^2}{4} \rho_{ж} g h$ представляет собой изменение веса ΔG буйка, поэтому равенство (8.8) можно преобразовать к виду

$$P_{\text{ВЫХ}} = k^* \Delta G, \quad (8.9)$$

где $k^* = l_1 / (f_{\text{эф}} l_3)$ — постоянный коэффициент.

Зависимость (8.9) позволяет градуировать буйковые уровнемеры весовым методом. Выходной сигнал пневматических буйковых уровнемеров изменяется в диапазоне 0,02—0,1 МПа при изменении уровня от нуля до максимального значения. Начальное значение выходного сигнала (0,02 МПа) задается пружиной 6 (см. рис. 8.3, а). Для предотвращения автоколебаний измерительной системы уровнемера служит демпфер 4. Герметизация технологического аппарата при установке в нем чувствительного элемента достигается уплотнительной мембраной 3. При необходимости боек может быть установлен в выносной камере, располагаемой вне технологическо-

го аппарата. Минимальный верхний предел измерений пневматических уровнемеров — 0,02 м, максимальный — 16 м.

Кроме рассмотренной модификации пневматических уровнемеров выпускаются уровнемеры, оснащенные унифицированным преобразователем «сила — давление» (см. рис. 5.4). Схема соединения буйка с унифицированным преобразователем приведена на рис. 8.3, б. Здесь 1 — груз, уравнивающий вес буйка; 2 — Т-образный рычаг унифицированного преобразователя 3.

Для преобразования уровня в унифицированный токовый сигнал разработаны буйковые электрические уровнемеры, оснащенные унифицированным преобразователем «сила — ток» (см. рис. 5.7). Подключение буйка к унифицированному преобразователю осуществляется по схеме, аналогичной схеме, приведенной на рис. 8.3, б. Верхние пределы измерений уровнемера с унифицированным электрическим сигналом ограничены значениями 0,02—16 м.

Буйковые средства измерений уровня применяются при температуре рабочей среды от —40 до +400°С и давлении рабочей среды до 16 МПа. Классы точности буйковых уровнемеров 1,0 и 1,5.

§ 8.5. Гидростатические средства измерений уровня

Измерение уровня гидростатическими уровнемерами сводится к измерению гидростатического давления P , создаваемого столбом h жидкости постоянной плотности ρ , согласно равенству

$$P = \rho gh . \quad (8.10)$$

Измерение гидростатического давления осуществляется:

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.

На рис. 8.4, а приведена схема измерения уровня манометром. Применяемый для этих целей манометр 1 может быть любого типа с соответствующими пределами измерений, определяемыми зависимостью (8.10). Измерение гидростатического давления манометром может быть осуществлено и по схеме, приведенной на рис. 8.4, б. Согласно данной схеме о значении измеряемого уровня судят по давлению воздуха, заполняющего манометрическую систему.

В нижней части манометрической системы расположен колокол 2, отверстие которого перекрыто тонкой эластичной мембраной 1, а в верхней — манометр 3. Применение эластичной мембраны исключает растворение воздуха в жидкости, однако вводит погрешность в определение уровня из-за упругости мембраны. Пре-

имуществом данной схемы измерения гидростатического давления является независимость показаний манометра от его расположения относительно уровня жидкости в резервуаре.

При измерении уровня по рассмотренным схемам имеют место погрешности измерения, определяемые классом точности манометров и изменениями плотности жидкости.

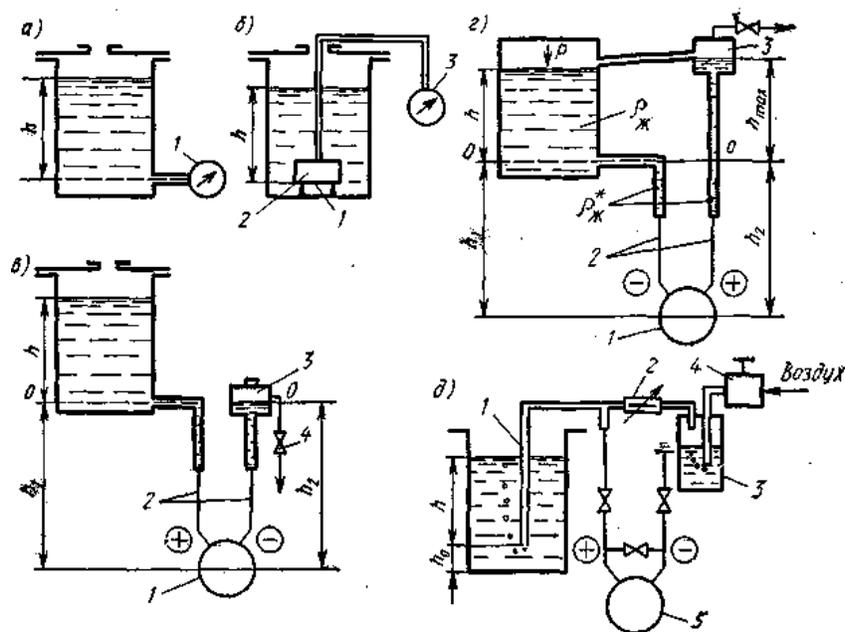


Рис. 8.4. Схемы измерения уровня гидростатическими уровнемерами

Измерение гидростатического давления манометрами целесообразно в резервуарах, работающих при атмосферном давлении. В противном случае, показания манометра складываются из гидростатического и избыточного давлений.

Для измерения уровня жидкости в технологических аппаратах, находящихся под давлением, широкое применение получили дифференциальные манометры. С помощью дифференциальных манометров возможно также измерение уровня жидкости в открытых резервуарах, уровня раздела фаз и уровня раздела жидкостей.

Измерение уровня в открытых резервуарах, находящихся под атмосферным давлением, осуществляется по схеме, представленной на рис. 8.4, в. Дифманометр 1 через импульсные трубки 2 соединен с резервуаром и уравнительным сосудом 3. Уравнительный сосуд применяется для компенсации статического давления, создаваемого столбом жидкости h_1 , в импульсной трубке. В процессе измерения уровень жидкости в уравнительном сосуде должен быть постоянным. Вентиль 4 служит для поддержания постоянного уровня

в сосуде 3. При равенстве плотностей жидкостей, заполняющих импульсные трубки и резервуар, и при условии $h_1 = h_2$ перепад давления, измеряемый дифманометром,

$$\Delta P = \rho_{\text{ж}} gh. \quad (8.11)$$

При измерении уровня в аппаратах, находящихся под давлением, применяют схему, приведенную на рис. 8.4, з. Уравнительный сосуд 3 в этом случае устанавливается на высоту, соответствующую максимальному значению уровня, и соединяют с аппаратом. Статическое давление P в аппарате поступает в обе импульсные трубки, поэтому измеряемый перепад давления ΔP можно представить в виде

$$\Delta P = \rho_{\text{ж}}^* gh_{\text{max}} - \rho_{\text{ж}} gh. \quad (8.12)$$

При $h = 0$ $\Delta P = \Delta P_{\text{max}}$, а при $h = h_{\text{max}}$ $\Delta P = 0$.

Как следует из уравнения (8.12), шкала измерительного прибора уровнемера будет обращенной. В рассмотренных схемах могут быть использованы дифманометры с унифицированным токовым или пневматическим сигналом.

Если жидкость, заполняющая резервуар, агрессивна, то подключение дифманометра к резервуару осуществляется через разделительные сосуды.

Уровнемеры, в которых измерение гидростатического давления осуществляется путем измерения давления газа, прокачиваемого по трубке, погруженной на фиксированную глубину в жидкость, заполняющую резервуар, называют *пьезометрическими*. Схема пьезометрического уровнемера приведена на рис. 8.4, д. Пьезометрическая трубка 1 размещается в аппарате, в котором измеряется уровень. Газ поступает в трубку через дроссель 2, служащий для ограничения расхода. Для измерения расхода газа служит стаканчик 3 (расход с помощью стаканчика определяется по числу пузырьков, пробулькивающих через заполняющую его жидкость в единицу времени), а давление поддерживается постоянным с помощью стабилизатора давления 4. Давление газа после дросселя измеряется дифманометром 5 и служит мерой уровня.

При подаче газа давление в пьезометрической трубке постепенно повышается до тех пор, пока указанное давление не станет равным давлению столба жидкости высотой h . Когда давление в трубке станет равным гидростатическому давлению, из нижнего открытого конца трубки начинает выходить газ. Расход подбирают такой, чтобы газ мокидал трубку в виде отдельных пузырьков (примерно один пузырек в секунду).

При большем расходе давление, измеряемое дифманометром, может быть несколько большим, чем гидростатическое, из-за дополнительного падения давления, возникающего за счет трения газа о стенки трубки при его движении. При очень малом расходе газа увеличивается инерционность измерения. Оба фактора могут увеличить погрешность измерения уровня.

В пьезометрических уровнемерах при больших изменениях уровня расход газа может существенно измениться, что, в свою очередь, может вызвать дополнительную погрешность измерения.

Для стабилизации расхода газа в пьезометрических уровнемерах промышленностью выпускается мембранный стабилизатор расхода, схема которого показана на рис. 8.5.

Действие стабилизатора основано на автоматическом регулировании постоянного перепада давления на дросселе *1*, который обуславливает постоянство расхода через него. Для регулирования этого перепада используется статический мембранный регулятор, который состоит из корпуса *6* и крышки *3*, между которыми установлена резиноканевая мембрана *5* с жестким центром *4*. Последний опирается на толкатель *10*, а сверху на него воздействует пружина *2*. Шарик *9*, на который воздействует пружина *8*, образует вместе с отверстием *7* в корпусе управляемый клапан. Ротаметр *11* служит для измерения расхода газа, подаваемого к пьезометрической трубке. Дроссель *1* выполнен переменным, что позволяет задавать регулируемое значение расхода.

Стабилизатор расхода работает следующим образом. Если по каким-либо причинам расход газа изменяется, например, уменьшается, соответственно уменьшается перепад давления на дросселе *1*. В результате действующая на мембрану сила F_1 , обусловленная перепадом давления на мембране, также уменьшается. Из-за того, что сила F_2 , развиваемая пружиной *2*, постоянна, уменьшение силы F_1 вызовет перемещение мембраны вниз. При этом толкатель *10* несколько увеличит зазор между шариком *9* и отверстием *7*, что увеличивает подачу газа под мембрану *5*, а следовательно, и давление в пространстве под ней и на входе дросселя *1*. Увеличение этого давления будет происходить до тех пор, пока с точностью до статической ошибки не будет восстановлен перепад Давления на дросселе *1*, а следовательно, и расход. В состоянии равновесия силы F_1 и F_2 , действующие на мембрану, равны.

Пьезометрические уровнемеры позволяют измерять уровень в широких пределах (от нескольких десятков сантиметров до 10—15 м), и при использовании для измерения давления в пьезометрической трубке дифманометра с унифицированным выходным сиг-

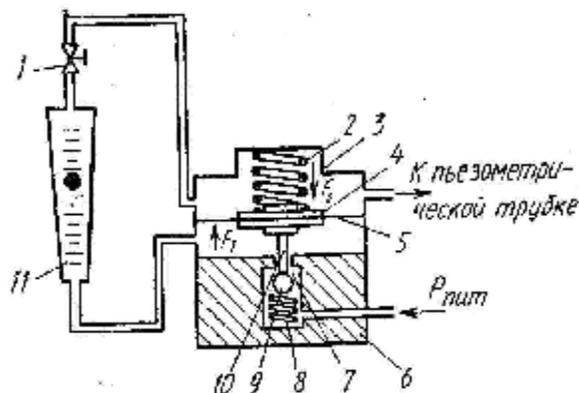


Рис. 8.5. Схема мембранного стабилизатора расхода воздуха:

1 — дроссель; *2* — пружина; *3* — крышка; *4* — жесткий центр; *5* — резиноканевая мембрана; *6* — корпус; *7* — отверстие; *8* — пружина; *9* — шарик; *10* — толкатель; *11* — ротаметр

налом имеют относительную приведенную погрешность $\pm(1,0—1,5) \%$.

Точность измерений уровня пьезометрическими уровнемерами может быть существенно увеличена, если в качестве средства измерений гидростатического давления использовать *автоматический цифровой манометр дискретно-непрерывного действия*. Манометр (рис. 8.6) состоит из деформационного чувствительного элемента — мембраны 9, центр которой жестко связан с подвижным электродом 11 дифференциального емкостного преобразователя малых перемещений. Неподвижные 10, 12 и подвижный 11 электроды дифференциального емкостного преобразователя малых перемещений включены в схему LC-моста индикатора перемещений 25.

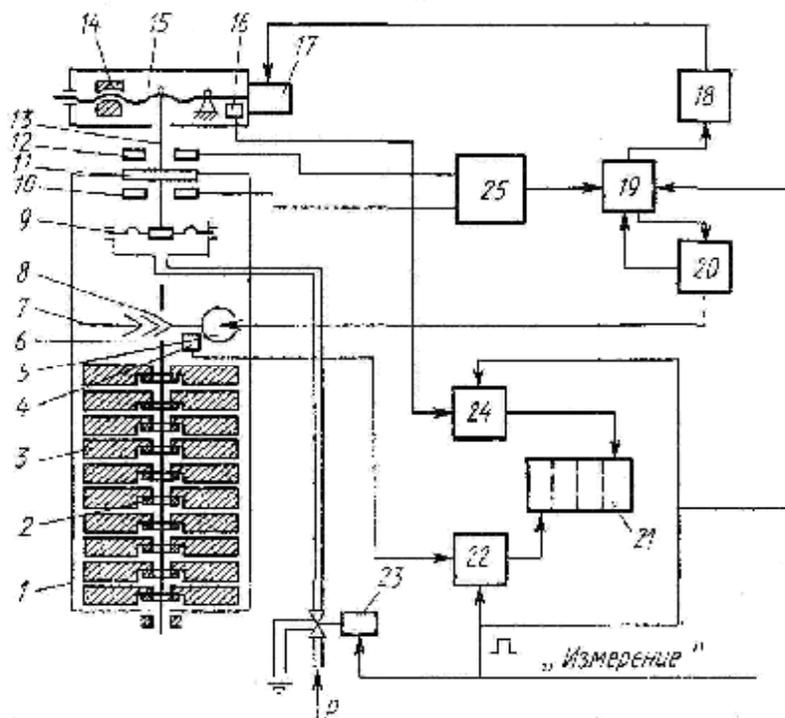


Рис. 8.6. Схема цифрового манометра дискретно-непрерывного действия

К подвижному электроду прикреплена грузовая тарелка 1, над которой расположен подъемно-навешивающий механизм, состоящий из набора грузов 3, перемещаемых с помощью втулок 2, закрепленных на подъемной штанге 6. Подъемная штанга способна перемещаться вверх или вниз благодаря передаточному механизму 8, связывающему шток с валом 7, приводимым во вращение электродвига-

телом 5. Над дифференциальным емкостным преобразователем малых перемещений расположен рейтерный механизм с рычагом 15, выполненным в виде микрометрического винта с подвижным грузом 14. Перемещение груза 14 осуществляется при вращении микрометрического винта электродвигателем 17. Измерение давления P осуществляется по сигналу «Измерение». В соответствии с этим сигналом клапан 23 соединяет подмембранную полость с объектом измерения. Под действием давления P мембрана 9 деформируется и электрод 11 отклоняется от нейтрали. В результате нарушается равновесие LC-моста, напряжение разбаланса которого после усиления воздействует на фазочувствительный каскад и переводит поляризацию реле индикатора перемещений 25 в одно из крайних положений, соответствующее направлению перемещения электрода. Этот сигнал через двухпозиционный ключ 19 воздействует на блок 20, который включает двигатель 5 так, что он начинает вращаться в направлении, при котором грузы 3 со штанги 6 опускаются на грузоприемную тарелку 1. Опускание грузов происходит до тех пор, пока на выходе индикатора 25 не появится сигнал, вызывающий реверс двигателя. При реверсе грузы снимаются с грузоприемной тарелки 1. Как только последний перекompенсирующий груз снимается с грузоприемной тарелки, на выходе индикатора 25 появляется сигнал отклонения электрода 11 вверх и блок 20 останавливает электродвигатель. В процессе компенсации грузами 3 усилия, развиваемого мембраной 9, частота вращения вала 7 преобразуется преобразователем 4 в электрические импульсы, подаваемые через ключ 22 на счетчик 21 (старший разряд). Одновременно с остановкой двигателя 5 блок 20 подает сигнал на второй вход ключа 19. При этом выход индикатора 25 подключается к блоку 18 непрерывной компенсации. Последний включает электродвигатель 17, приводящий во вращение микрометрический винт 15, по которому начинает перемещаться груз 14. Перемещение груза происходит в сторону увеличения компенсирующего усилия.

Частота вращения винта 15 преобразуется в электрические импульсы, которые через ключ 24 поступают на счетчик 21 (младший разряд). Вращение винта происходит до тех пор, пока мембрана, а вместе с ней и электрод не придут в нейтральное положение. При этом двигатель останавливается. О значении измеряемого давления судят по числу импульсов, отсчитанных счетчиком. После снятия сигнала «Измерение» показания счетчика сбрасываются на «нуль» и клапан 23 отключается, соединяя внутреннюю полость чувствительного элемента с атмосферой.

Пределы измерений цифрового манометра $0—10^5$ Па, приведенная погрешность $\pm 0,05$ %.

Благодаря простоте реализации на базе пьезометрических уровнемеров, оснащенных цифровыми манометрами дискретно-непрерывного действия, разработаны весомеры. Определение массы жидкости в резервуаре по показаниям пьезометрического уровнемера

осуществляется в соответствии с зависимостью

$$M = \frac{1}{g} PS(h), \quad (8.13)$$

где P — измеряемое гидростатическое давление; $S(h)$ — средняя площадь резервуара при его заполнении до высоты h .

Числовое значение $S(h)$ определяют по градуировочным таблицам, составленным для каждого резервуара. Описанный принцип измерений массы жидкости в резервуарах положен в основу измерительной системы учета количества нефтепродукта в резервуарах. Приведенная погрешность измерения гидростатического давления не превышает $\pm 0,05\%$. Максимальная приведенная погрешность измерения массы нефтепродукта в резервуаре $\pm 0,5\%$. Максимальное число обслуживаемых резервуаров 10. Система учета оснащается схемой пневмосигнализации значений уровня в резервуарах.

§ 8.6. Электрические средства измерений уровня

По виду чувствительного элемента электрические средства измерений уровня подразделяют на емкостные и кондуктометрические.

Емкостные уровнемеры. В уровнемерах этого типа используется зависимость электрической емкости чувствительного элемента первичного измерительного преобразователя от уровня жидкости. Конструктивно емкостные чувствительные элементы выполняют в виде коаксиально расположенных цилиндрических электродов или параллельно расположенных плоских электродов. В номенклатуру средств измерений уровня ГСП входят емкостные уровнемеры с коаксиально расположенными электродами. Конструкция емкостного чувствительного элемента с коаксиально расположенными электродами определяется физико-химическими свойствами жидкости. Для неэлектропроводных (диэлектрических) жидкостей — жидкостей, имеющих удельную электропроводность менее 10^{-6} См/м, применяют уровнемеры, оснащенные чувствительным элементом, схемы которого представлены на рис. 8.7.

Чувствительный элемент (рис. 8.7, а) состоит из двух коаксиально расположенных электродов 1 и 2, частично погруженных в жидкость. Электроды образуют цилиндрический конденсатор, межэлектродное пространство которого до высоты h заполнено жидкостью, а пространство $H - h$ — парогазовой смесью. Для фиксирования взаимного расположения электродов предусмотрен изолятор 3.

В общем виде электрическая емкость цилиндрического конденсатора определяется уравнением

$$C = 2\pi\epsilon\epsilon_0 H / [\ln(D/d)], \quad (8.14)$$

где ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость вещества,

заполняющего межэлектродное пространство; ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; H — высота электродов; D, d — диаметры соответственно наружного и внутреннего электродов.

Для цилиндрического конденсатора, межэлектродное пространство которого заполняется веществами, обладающими различными диэлектрическими проницаемостями, как показано

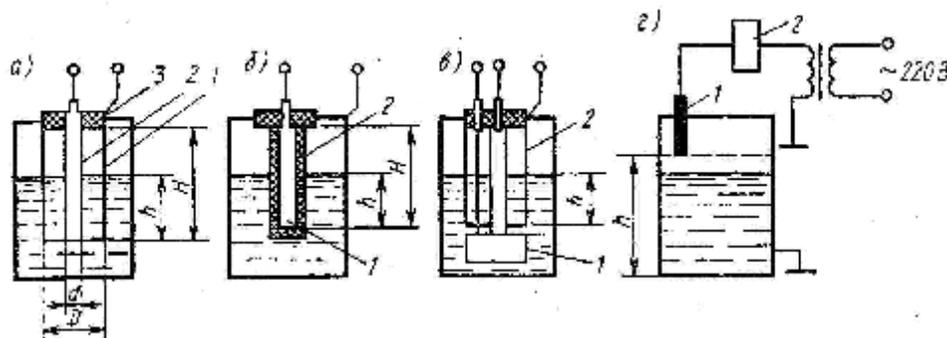


Рис. 8.7. Схемы электрических средств измерений уровня

на рис. 8.7, а, полная емкость C_{Π} определяется выражением [3]:

$$C_{\Pi} = C_0 + C_1 + C_2, \quad (8.15)$$

где C_0 — емкость проходного изолятора; C_1 — емкость межэлектродного пространства, заполненного жидкостью; C_2 — емкость межэлектродного пространства, заполненного парогазовой смесью. С учетом уравнения (8.14) полную емкость чувствительного элемента представим в виде

$$C_{\Pi} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{ж}h}{\ln(D/d)} + \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_{г}(H-h)}{\ln(D/d)} + C_0. \quad (8.16)$$

Так как для паров жидкости и газов $\epsilon_{г} \approx 1$, а C_0 — величина постоянная, уравнение (8.16) можно преобразовать следующим образом:

$$C_{\Pi} = C_0 + \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(D/d)} H \left[1 + (\epsilon_{ж} - 1) \frac{h}{H} \right]. \quad (8.17)$$

Уравнение (8.17) представляет собой статическую характеристику емкостного чувствительного элемента для неэлектропроводных сред. Величина $\epsilon_{ж}$ является функцией температуры, поэтому для исключения влияния температуры жидкости на результат измерения применяют компенсационный конденсатор (рис. 8.7, в). Компенсационный конденсатор 1 размещается ниже ёмкостного чувствительного элемента 2 и полностью погружен в жидкость. В некоторых случаях при постоянстве состава жидкости его заменяют конденсатором постоянной емкости.

Для измерения уровня электропроводных жидкостей — жидкостей с удельной проводимостью более 10^{-4} См/м применяют ур-

немеры, оснащенные емкостным чувствительным элементом, изображенным на рис. 8.7, б. Чувствительный элемент представляет собой металлический электрод 1, покрытый фторопластовой изоляцией 2. Электрод частично погружен в жидкость. В качестве второго электрода используется либо стенка резервуара, если она металлическая, либо специальный металлический электрод, если стенка резервуара выполнена из диэлектрика. Полная емкость чувствительного элемента, изображенного на рис. 8.7, в, определяется уравнением [3]:

$$C_{\Pi} = C_0 + \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}, \quad (8.17)$$

где C_0 — емкость проходного изолятора; C_1 — емкость конденсатора, образованного электродом 1 и поверхностью жидкости на границе с изолятором; C_2 — емкость конденсатора, образованного поверхностью жидкости на границе с изолятором и стенками резервуара.

Преобразование электрической емкости чувствительных элементов в сигнал измерительной информации осуществляется мостовым, резонансным или импульсным методом.

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.

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.

Разработаны емкостные уровнемеры сыпучих сред. Верхние пределы измерений уровнемеров ограничены значениями 4—20 м. Класс точности 2,5.

Кондуктометрические сигнализаторы уровня. Уровнемеры этого вида предназначены для сигнализации уровня электропроводящих жидких сред и сыпучих сред с удельной проводимостью более 10^{-3} См/м. На рис. 8.7, г приведена схема сигнализатора верхнего предельного уровня жидкости. В соответствии со схемой при достижении уровнем значения h замыкается электрическая цепь между электродом 1 и корпусом технологического аппарата. При этом срабатывает реле 2, контакты которого включены в схему сигнализации.

Принцип действия кондуктометрических сигнализаторов уровня сыпучих сред аналогичен рассмотренному.

Электроды, применяемые в кондуктометрических сигнализаторах уровня, изготавливают из стали специальных марок или угля. Причем угольные электроды используются только при измерении уровня жидких сред.

§ 8.7. Акустические средства измерений уровня

В настоящее время предложены различные принципы построения акустических уровнемеров, из которых широкое распространение получил принцип локации.

В соответствии с этим принципом измерение уровня осуществляют по времени прохождения ультразвуковыми колебаниями расстояния от излучателя до границы раздела двух сред и обратно до приемника излучения. Локация границы раздела двух сред осуществляется либо со стороны газа, либо со стороны рабочей среды (жидкости или сыпучего материала). Уровеньмеры, в которых локация границы раздела двух сред осуществляется через газ, называют акустическими, а уровнемеры с локацией границы раздела двух сред через слой рабочей среды — ультразвуковыми.

Преимуществом акустических уровнемеров является независимость их показаний от физико-химических свойств и состава рабочей среды. Это позволяет использовать их для измерения уровня неоднородных кристаллизирующихся и выпадающих в осадок жидкостей. К недостаткам следует отнести влияние на показания уровнемеров температуры, давления и состава газа.

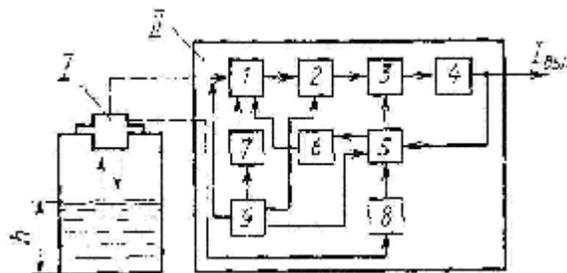


Рис. 8.8. Схема акустического уровнемера

Как правило, акустические уровнемеры представляют собой сочетание первичного, промежуточного, а в некоторых случаях и передающего измерительных преобразователей. Поэтому, строго говоря, акустические уровнемеры следует рассматривать как часть измерительной системы с акустическими измерительными преобразователями.

На рис. 8.8 приведена схема акустического уровнемера жидких сред. Уровнемер состоит из первичного I и промежуточного II преобразователей. Первичный преобразователь представляет собой пьезоэлемент, выполняющий одновременно функции источника и приемника ультразвуковых колебаний. При измерении генератор 9 с определенной частотой вырабатывает электрические импульсы, которые преобразуются пьезоэлементом I в ультразвуковые импульсы. Последние распространяются вдоль акустического тракта,

отражаются от границы раздела жидкость — газ и воспринимаются тем же пьезоэлементом, преобразующим их в электрические импульсы. После усиления устройством 1 импульсы подаются на схему измерения 2 времени отражения сигнала, где они преобразуются в прямоугольные импульсы определенной длительности. В ячейке сравнения 3 осуществляется сравнение импульса, подаваемого со схемы 2, с длительностью импульса, подаваемого с элемента обратной связи 5, который преобразует унифицированный токовый сигнал в прямоугольный импульс определенной длительности. Если длительность импульса схемы измерения 2 отличается от длительности импульса цепи обратной связи, то на выходе ячейки сравнения 3 появляется сигнал разбаланса, который усилительно-преобразующим устройством 4 изменяет выходной унифицированный токовый сигнал до тех пор, пока не будет достигнуто равенство длительностей импульсов. Для уменьшения влияния температуры на сигнал измерительной информации предусмотрен блок температурной компенсации 8. Контроль за работой электрической схемы осуществляется блоком контроля 7. Исключение влияния различного рода помех на работу промежуточного преобразователя достигается с помощью помехозащитного устройства 6.

Расстояние между первичным и промежуточным преобразователями — не более 25 м. Диапазоны измерений уровня 0—1; 0—2; 0—3 м. Класс точности 2,5. Температура контролируемой среды 10—50 °С, давление в технологическом аппарате до 4 МПа.

Акустические уровнемеры сыпучих сред по принципу действия и устройству аналогичны акустическим уровнемерам жидких сред. Акустические уровнемеры сыпучих сред входят в номенклатуру приборов ГСП и имеют унифицированный токовый сигнал. Они могут быть одноточечными и многоточечными. Многоточечные уровнемеры состоят из нескольких (до 30) первичных измерительных преобразователей акустического типа, каждый из которых размещается на отдельном технологическом аппарате и через коммутатор подключаются к промежуточному измерительному преобразователю. Уровнемеры выпускаются во взрывобезопасном исполнении. Классы точности 1,0; 1,5. Минимальный диапазон измерений 0—2,5 м, максимальный 0—30 м. Контролируемая среда — гранулы диаметром 2—200 мм.

ГЛАВА 9

КАЧЕСТВО СЫРЬЯ И ПРОДУКЦИИ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТОДАХ И СРЕДСТВАХ ЕГО АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

§ 9.1. Характеристики, определяющие качество сырья и продукции химико-технологических процессов

Качество продукции относится к числу важнейших показателей производственно-хозяйственной деятельности предприятий и объединений нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и других отраслей промышленности, базирующихся на использовании химико-технологических процессов, и во многом зависит от качества сырья. Последнее является продукцией предыдущих производственных процессов, поэтому в дальнейшем изложении будут рассматриваться обобщенные понятия и представления, относящиеся к качеству продукции.

Качество продукции в современном представлении — это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением.

Из этого определения следует, что за исходную характеристику качества продукции принято ее свойство.

Свойство продукции — объективная особенность продукции, проявляющаяся при ее создании, эксплуатации или потреблении. Продукция каждого конкретного вида имеет множество различных свойств, совокупность которых позволяет отличить ее от другой продукции.

Все аспекты, связанные с качеством продукции, изучаются наукой о качестве продукции. Одна из основных областей этой науки, объединяющая методы количественной оценки качества — *квалиметрия* (от лат. *qualification* — какой, какого качества и греч. *metreo* — меряю).

Совокупность свойств продукции еще не характеризует ее качество. Важно количественно определить свойства продукции, обуславливающие это качество. Для этого используются различные (единичный, комплексный, определяющий, интегральный) показатели качества продукции.

Показатель качества продукции — количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, обуславливаю-

щих ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям создания, эксплуатации или потребления продукции.

Значение показателей качества продукции определяют *измерительным (экспериментальным), расчетным и экспертным методами.*

Измерительный метод базируется на выполнении измерений. Расчетным методом значения показателей качества определяются с помощью вычислений с использованием параметров, найденных другими методами. Если показатели качества не поддаются на настоящем этапе развития науки и техники измерениям, то используется экспертный метод, в соответствии с которым оценка показателя качества осуществляется в баллах. Экспертным является также органолептический метод, основанный на анализе непосредственно восприятия органами чувств экспертов свойств продукции.

Качество продукции предприятий нефтеперерабатывающей, нефтехимической и химической отраслей промышленности в настоящее время определяется в основном путем лабораторных определений комплексов показателей качества, базирующихся, как правило, на измерительном методе.

Непосредственно на химико-технологических процессах качество продукции определяется путем автоматических измерений физико-химических свойств, концентрации определяемого компонента (компонентов) или полного состава продукции, которые служат в данном случае показателями ее качества. В процессах, связанных с переработкой нефти, осуществляются измерения ряда характеристик сырья, промежуточных и конечных продуктов по существу полностью соответствующим понятию «показатель качества».

Все эти измерения относятся к *физико-химическим измерениям* (см. гл. 1) и осуществляются с помощью *автоматических средств аналитической техники*, являющейся отдельной отраслью измерительной техники.

Рассмотрим некоторые важные понятия, связанные с перечисленными показателями качества продукции. В результате проведения химико-технологических процессов вырабатываются жидкие, газообразные и твердые продукты. Их называют *веществами, средами* или *материалами*.

В общем случае *веществом* называют различные виды материи. В химии часто под веществом понимают так называемое «чистое вещество». Строго это представление относится к идеально чистым веществам. Все реальные вещества содержат примеси в больших или малых количествах.

В аналитической технике используется понятие *анализируемое вещество*, под которым понимают смесь нескольких веществ, подвергаемую анализу.

Каждому веществу присущи физические и химические свойства. *Физическое свойство вещества* — это физическая величина, а *химическое свойство вещества* — это способность данного вещества участвовать в химических реакциях. Два этих свойства обычно для веществ объединяют понятием *физико-химические свойства*. К фи-

зико-химическим относят такие свойства, как плотность, вязкость, коэффициент преломления, давление насыщенных паров, теплота сгорания и др.

Физико-химическое свойство какого-либо вещества зависит от его природы и, будучи определенным с помощью различных методов и средств измерений с точностью до погрешности измерений, имеет одно и то же значение.

В отличие от физико-химических свойств упомянутые выше *показатели качества*, используемые для оценки качества нефтей и нефтепродуктов, имеют различные значения при их измерении различными методами и средствами измерений. Поэтому методы и средства измерений показателей качества строго стандартизируются. К показателям качества нефтепродуктов относятся фракционный состав, октановое число, температура вспышки и др.

Как следует из приведенного определения, анализируемое вещество представляет собой смесь. Поэтому при решении задачи определения состава анализируемого вещества его называют *анализируемой смесью*.

Каждая смесь состоит из двух и более составных частей, называемых *компонентами*.

Различают *качественный* и *количественный состав смеси*. Первый представляет собой информацию о том, какие компоненты входят в смесь, второй, кроме того, дает информацию о количестве этих компонентов в смеси. Количественный состав характеризуется концентрацией (содержанием) отдельных компонентов.

Концентрация — отношение количества компонента к количеству всей смеси, взятой на анализ, т. е. относительное количество компонента в смеси.

Различают *массовую* c_m , *объемную* c и *молярную (мольную)* c_μ *концентрации*, определяемые как отношение массы, объема или количества вещества данного компонента соответственно к массе, объему или количеству вещества всей смеси. Концентрации выражают в долях или процентах (соответственно в процентах массовых — % мас., в процентах объемных — % об. и в процентах молярных — % мол.).

Связь между перечисленными концентрациями описывается выражением

$$c_{mi} = c_i \frac{\rho_i}{\rho} = c_{\mu i} \frac{\mu_i}{\mu}, \quad (9.1)$$

где ρ_i и μ_i — плотность и молекулярная масса i -го компонента; ρ и μ — плотность и молекулярная масса анализируемой смеси.

Массовую концентрацию выражают также отношением

$$\left[\frac{\text{ед. массы}}{\text{ед. объема}} \right] \text{ (например, кг/м}^3, \text{ г/см}^3 \text{ и т. д.)}, \text{ а молярную — отношением:}$$
$$\left[\frac{\text{ед. количества вещества}}{\text{ед. объема}} \right] \text{ (например, моль/м}^3; \text{ моль/см}^3 \text{ и т. д.)}.$$

Анализируемые смеси принято подразделять на бинарные, многокомпонентные и псевдобинарные.

Бинарная смесь — смесь, состоящая из двух компонентов.

Многокомпонентная смесь — смесь, состоящая из трех и более компонентов.

Псевдобинарная смесь — многокомпонентная смесь, которая при определенных условиях по некоторому физико-химическому свойству может рассматриваться как бинарная.

Компоненты, составляющие смеси, подразделяют на определяемые и неопределяемые.

Определяемый компонент — компонент смеси, подлежащий количественному определению. Часто этот компонент (или компоненты) называют ключевым, так как информация о его концентрации используется для управления технологическими процессами.

Неопределяемый компонент — компонент смеси, не подлежащий количественному определению.

§ 9.2. Значение автоматического контроля качества сырья и продукции химико-технологических процессов

Характерной чертой развития современных технологических процессов является ориентация на производство продукции повышенного качества.

Особая роль в решении задачи повышения качества продукции и эффективности управления в отраслях промышленности, базирующихся на использовании химико-технологических процессов, наряду с внедрением новых процессов, комбинированных и укрупненных технологических установок отводится автоматизированным системам управления технологическими процессами (АСУ ТП).

Современные АСУ ТП, как правило, включают в свой состав в качестве одной из подсистем систему автоматического контроля качества сырья промежуточных и конечных продуктов. Работа этой подсистемы во многом определяет эффективность всей АСУ ТП, так как обеспечивает возможное проведение технологического процесса не по косвенным (давление, температура, расход, уровень и т. д.) параметрам, а по целевым параметрам — показателям качества, что упрощает проведение процесса и повышает качество продукции. Кроме того, автоматический контроль качества продукции химико-технологических процессов в настоящее время приобретает решающее значение в связи с непрерывным ростом мощностей технологических установок. Промахи при управлении такими установками недопустимы, так как могут привести к большим потерям для народного хозяйства.

В настоящее время для автоматического контроля качества продукции химико-технологических процессов используются средства измерений названных выше показателей качества, принцип действия которых основан на различных физических явлениях и химических реакциях. Эти средства измерений позволяют в прин-

ципе решать многие задачи автоматического контроля качества, однако непрерывно развивающаяся технология процессов постоянно порождает все новые и новые задачи контроля качества. Это определяет необходимость постоянных исследований и разработок, направленных на совершенствование известных и создание новых средств аналитической техники. Общими задачами, решаемыми при этом, являются: увеличение быстродействия, точности и надежности средств аналитической техники. Это связано с тем, что указанные характеристики современных средств аналитической техники еще во многих случаях не отвечают требованиям автоматизированного управления технологическими процессами. Отмеченными обстоятельствами объясняется существующее в настоящее время противоречие между огромными возможностями электронных вычислительных машин в части обработки информации и управления и весьма ограниченными возможностями получения исходной информации о качестве сырья и продукции химико-технологических процессов.

§ 9.3. Общие сведения о методах и средствах автоматического контроля качества продукции химико-технологических процессов

В основе автоматического контроля качества продукции химико-технологических процессов лежит химический анализ, поэтому его часто называют *автоматическим аналитическим контролем*.

Химический анализ (от греч. *analysis* — разложение, расчленение, разбор) — совокупность операций, цель которых установить, из каких веществ состоит исследуемый объект (качественный анализ) или в каких количествах в него входят те или иные вещества (количественный анализ).

Различают три группы методов анализа: физические, физико-химические и химические.

Физические методы анализа основаны на измерении физических величин, присущих анализируемому веществу, например измерение плотности, вязкости анализируемого вещества и др.

Физико-химические методы анализа основаны на химических превращениях анализируемого вещества и измерении физических величин, сопровождающих эти превращения, например температуры или излучения в процессе окисления анализируемого вещества.

Химические методы анализа основаны на химических превращениях и измерении количества продуктов этих превращений.

Используемое в научной и технической литературе подразделение методов анализа на физико-химические и химические весьма условно.

В зависимости от наличия предварительного воздействия на анализируемое вещество различают: *методы анализа без преобразования анализируемого вещества* (непосредственное измерение

физических свойств) и *методы с предварительным преобразованием анализируемого вещества*. При реализации последних используются физические и химические методы преобразования анализируемого вещества.

Физическими называют преобразования, при которых изменяются физические свойства анализируемого вещества, а состав остается неизменным (например, изменение агрегатного состояния вещества).

Химическими называют преобразования, при которых изменяется состав анализируемого вещества.

Методы анализа состава веществ подразделяют на избирательные и интегральные.

Избирательными (селективными) называют методы анализа состава, базирующиеся на использовании физического явления или химической реакции, избирательно (однозначно) зависящей от концентрации в смеси определенного компонента или группы компонентов одного класса.

Интегральными (неизбирательными) называют методы анализа состава, базирующиеся на различии в физико-химических свойствах компонентов смеси.

Анализ сырья и продукции химико-технологических процессов осуществляется с помощью средств аналитической техники, а именно автоматических и полуавтоматических анализаторов, а также индикаторов. Эти средства называют *анализаторами качества* или *аналитическими приборами*.

Анализатор — измерительный прибор, измерительные установки или измерительные системы, предназначенные для анализа состава или свойств анализируемого вещества.

Автоматический анализатор — анализатор, в котором все операции осуществляются автоматически.

Полуавтоматический анализатор — анализатор, в котором автоматически осуществляется большая часть операций (обычно не автоматизированы операции ввода и вывода пробы анализируемого вещества).

Индикатор (определитель, сигнализатор) — анализатор, вырабатывающий информацию о качественном составе анализируемого вещества (например, о наличии или отсутствии какого-либо компонента).

Анализаторы подразделяют на *лабораторные* и *промышленные*. На рис. 9.1 приведена классификация промышленных анализаторов по наиболее важным признакам.

В дополнение к приведенной классификации следует добавить следующее: *анализатором непрерывного действия* называют анализатор, предназначенный для непрерывного анализа потока анализируемого вещества, *анализатором циклического действия* — анализатор, предназначенный для непрерывного анализа проб анализируемого вещества, сменяющихся в полном объеме с определенной циклическостью.

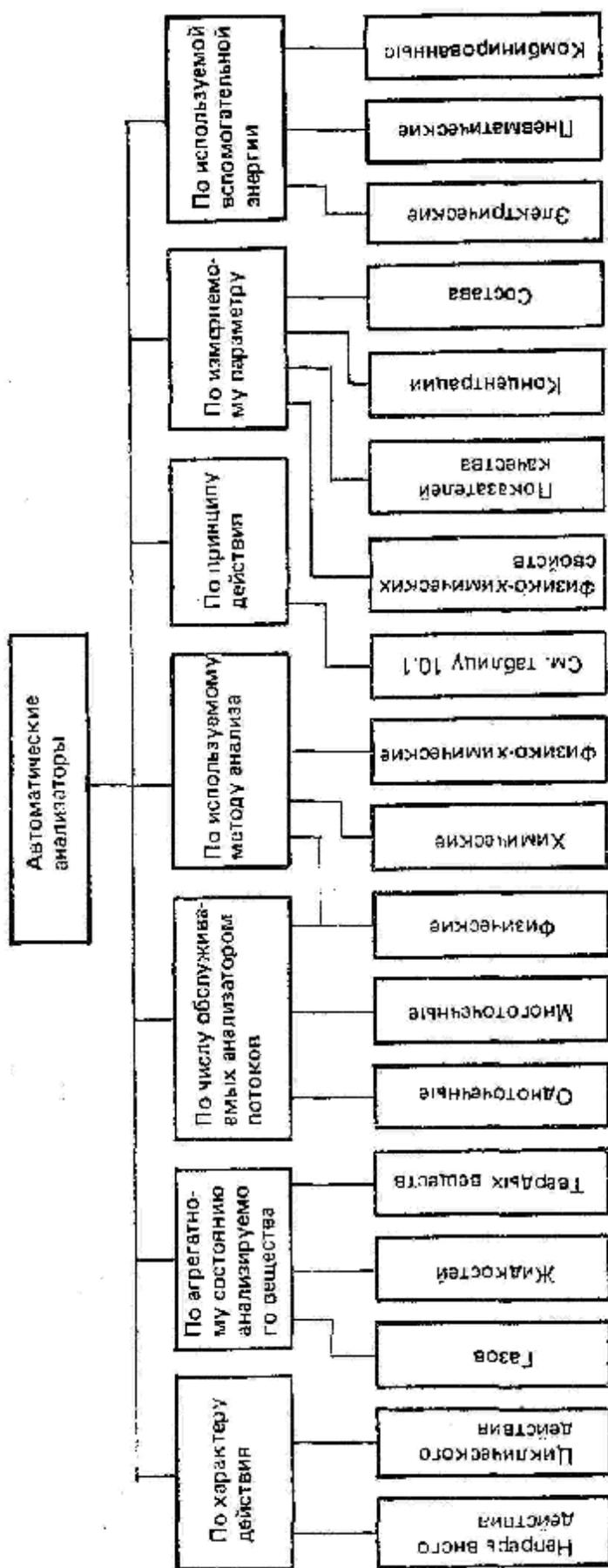


Рис. 9.1. Классификация автоматических анализаторов

Анализаторы, предназначенные для анализа газообразных сред, называют *газоанализаторами*.

Классификация автоматических анализаторов по принципу действия, учитывающая используемый метод анализа, приведена в табл. 9.1. Подробное описание большинства приведенных в табл. 9.1 принципов действия автоматических анализаторов дано в гл. 10—.

Таблица 9.1

Классификация автоматических анализаторов по принципу действия

Метод анализа	Принципы действия
Физический	Механический Диффузионный Акустический Тепловой Аэрозольный Сорбционный Магнитный Радиоизотопный (радиоактивный) Радиоспектрометрический Рентгеноспектральный Спектральный оптический
Физико-химический	Электрохимический Термохимический Эмиссионный Ионизационный Хемилюминесцентный
Химический	Титрометрический Объемный (волюметрический)

13. Автоматические анализаторы, как и средства государственной системы приборов (см. § 2.9), классифицируются по исполнению, что определяет возможность их применения на химико-технологических процессах.

Автоматические анализаторы с позиций метрологии в зависимости от структуры рассматриваются как измерительные приборы, измерительные установки или измерительные системы, поэтому их метрологические характеристики определяются и нормируются в

соответствии с общими положениями, изложенными в § 2.6, 2.9. Для автоматических анализаторов качества принято также нормировать стабильность показаний (время сохранения постоянства показаний) и время прогрева [19], определяющее интервал времени, необходимый для приведения анализатора в рабочее состояние.

§ 9.4- Структурные схемы и сигналы автоматических анализаторов

Автоматические анализаторы являются сложными измерительными системами, включающими в свой состав помимо различных измерительных устройств разнообразные вспомогательные устройства.

Упрощенные структурные схемы автоматических анализаторов непрерывного и циклического действия показаны на рис. 9.2, а, б. Анализируемое вещество поступает в первичный измерительный преобразователь 3 автоматических анализаторов; через устройства отбора 1 и подготовки 2 анализируемого вещества (или, как говорят, пробы анализируемого вещества). Зачастую они представляют собой сложные технические

устройства, включающие в себя, как правило, различные побудители расхода, теплообменники, устройства очистки и стабилизации параметров анализируемого вещества. Конструкция и характеристики этих устройств во многом определяют работоспособность автоматических анализаторов, оказывают влияние на их статические и динамические характеристики. Первичные измерительные преобразователи, или *аналитические устройства* * анализаторов непрерывного и циклического действия, по структуре различны.

Аналитическое устройство 3 анализатора непрерывного действия (рис. 9.2, а) состоит из устройства воздействия на анализируемое вещество 4 и чувствительного элемента 5.

Устройство 4 обеспечивает воздействие на анализируемое вещество соответствующим видом энергии или веществом с целью пре-

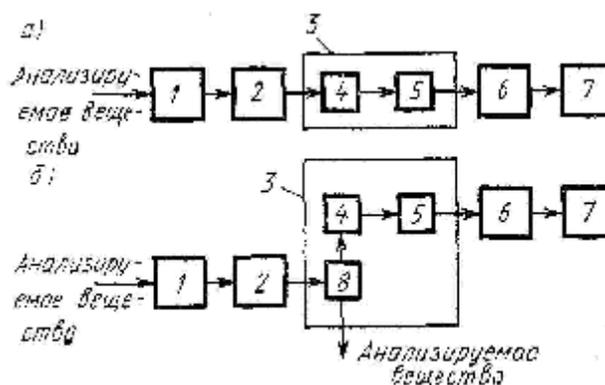


Рис. 9.2. Структурные схемы автоматических анализаторов

* Использование термина «аналитическое устройство» предпочтительнее, так как в большинстве случаев рассматриваемое устройство само содержит в качестве одной из частей один или несколько различных первичных измерительных преобразователей.

образования его физико-химических свойств или формирования условий, обеспечивающих протекание физических процессов или химических реакций. Чувствительный элемент 5 (в некоторых анализаторах первичный измерительный преобразователь) воспринимает физико-химическое свойство или параметр, сопровождающие физический процесс или химическую реакцию, и преобразует их в выходной сигнал (обычно электрический или пневматический), который через масштабирующий измерительный преобразователь 6 поступает на показывающий или самопишущий измерительный прибор 7.

Чувствительный элемент 5 в некоторых анализаторах называют детекторами.

Если используемый принцип действия не требует каких-либо преобразований анализируемого вещества, то устройство 4 в составе анализатора отсутствует. Выходной сигнал автоматических анализаторов непрерывного действия имеет вид, показанный на рис. 9.3, *а*.

В состав автоматических анализаторов циклического действия, помимо уже названных устройств, входит дозирующее устройство (дозатор) 8 (рис. 9.2, *б*), расположенное в аналитическом устройстве 3. Дозатором из потока анализируемого вещества, поступающего из устройства 2, отбирается постоянная по объему (реже по массе) проба. Эта проба подвергается соответствующему воздействию в устройстве 4, после чего чувствительный элемент осуществляет преобразование физико-химического свойства пробы или параметра, сопровождающего указанное воздействие, в выходной сигнал.

Формы сигналов чувствительных элементов автоматических анализаторов циклического действия разнообразны и зависят от используемого в работе анализатора принципа действия. Наиболее распространенные формы этих сигналов показаны на рис. 9.3, *б—з*.

Простейшими по форме являются сигналы в виде кривой нормального распределения (рис. 9.3, *б*) или трапеции (рис. 9.3, *в*). В первом случае в качестве информативного параметра сигнала используется амплитуда U_{\max} или площадь S сигнала, во втором — высота. Такие формы сигналов характерны для анализаторов физико-химических свойств веществ и концентрации отдельных компонентов в бинарных и многокомпонентных смесях. Сигнал в виде спектра импульсов (пиков), показанный на рис. 9.3, *з*, характерен для анализаторов состава многокомпонентных смесей. Здесь каждому пику соответствует определенный компонент или фрагменты этого компонента (см. гл. 12).

Сигналы сложной формы (рис. 9.3, *д, е*) характерны для анализаторов показателей качества (см. гл. 13). Практически во всех случаях сигналы анализаторов циклического действия требуют специальной обработки, что выполняется с помощью различных вычислительных и запоминающих устройств, которые обычно включаются между масштабирующим преобразователем 6 и измерительным

прибором 7 (см. рис. 9.2). Выходной сигнал вычислительных устройств имеет обычно формы, показанные на рис. 9.3, *ж*, *з*. Результат измерения в каждом цикле (рис. 9.3, *ж*) представляется отдельным пиком или штрихом (при малой скорости диаграммной ленты самопишущего прибора). Огибающая амплитуд этих пиков позволит получить информацию об изменениях измеряемого параметра

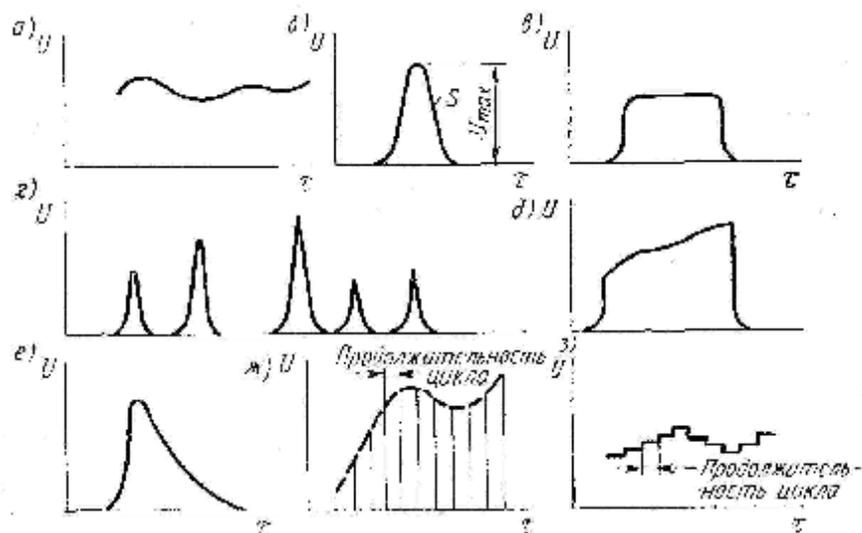


Рис. 9.3. Формы сигналов автоматических анализаторов

во времени. Если вычислительное устройство снабжено запоминающим устройством, то его выходной сигнал представляется ступенчатой кривой (рис. 9.3, *з*), так как информация о результатах измерений, полученных в предыдущем цикле работы анализатора, запоминается на один цикл. Такая форма выходного сигнала анализатора циклического действия удобна для дальнейшего использования в системах автоматического регулирования и управления.

§ 9.5. Способы подключения автоматических анализаторов к технологическим потокам

В общем случае способ подключения автоматического анализатора к технологическому потоку определяется рядом факторов, среди которых наиболее важными являются: принцип действия анализатора, конструкция устройства отбора анализируемого вещества, требования к скорости анализа, характеристики потока анализируемого вещества.

Наиболее часто используемые способы подключения автоматических анализаторов к технологическим потокам схематично изображены на рис. 9.4.

Простым и удобным для приборостроителей и эксплуатацион-

ников является бесконтактный способ (рис. 9.4, а), при котором анализируемое вещество не вводится в анализатор, а анализ проводится через стенку технологического аппарата 1 или специальную вставку в ней, около которой располагается автоматический анализатор 2.

Другим, также относительно простым является метод подключения анализаторов (рис. 9.4, б), при котором чувствительный элемент 3 анализатора 2 расположен непосредственно в технологическом

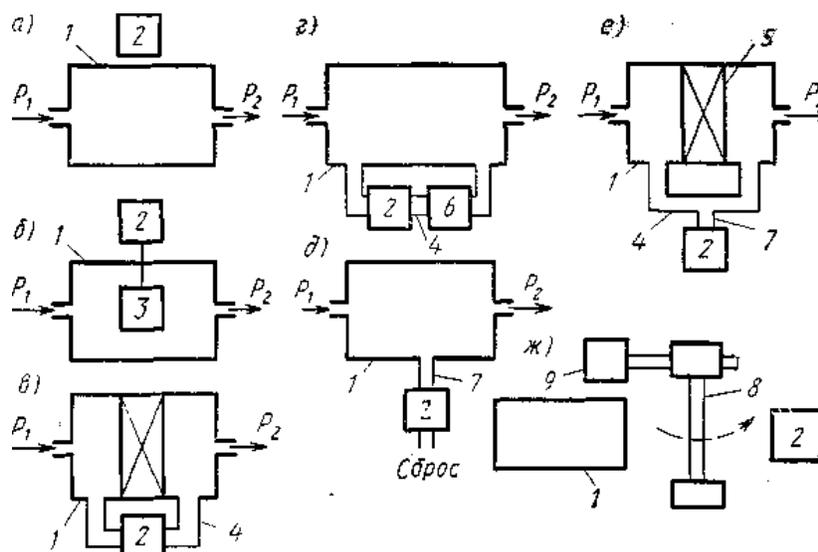


Рис. 9.4. Способы подключения автоматических анализаторов к технологическим потокам

аппарате или потоке 1. Как первый, так и второй способ исключают необходимость использования сложных устройств отбора и подготовки анализируемого вещества. Однако лишь незначительное число принципов измерений физико-химических свойств и состава позволяют реализовать такие способы подключения автоматических анализаторов к технологическим потокам.

В большинстве случаев используются способы подключения, представленные на рис. 9.4, в — е. Замкнутый способ подключения анализатора (рис. 9.4, в, г), при котором анализатор 2 устанавливается на байпасной линии 4, реализуется либо за счет наличия гидравлического сопротивления 5 между точками отбора и возврата анализируемого вещества в технологический поток или аппарат 1, либо за счет включения последовательно с анализатором 2 в линию 4 побудителя расхода б (рис. 9.4, г). Замкнутый способ отбора обеспечивает возврат всего отобранного анализируемого вещества в технологический поток, что обуславливает достаточно большой расход этого вещества через байпасную линию и, следо-

вательно, малое время транспортного запаздывания в системе отбора анализируемого вещества.

Однако не все автоматические анализаторы могут быть подключены к потоку данным способом. На рис. 9.4, д представлен способ подключения анализатора со сбросом анализируемого вещества, что предполагает возможность сброса последнего после выхода из анализатора 2 в атмосферу, канализацию или специальную емкость. Для уменьшения значения времени транспортного запаздывания длина линии 7, соединяющей технологический аппарат или поток 1 с анализатором, должна быть минимальной. Данным способом можно подключить к технологическому потоку практически все автоматические анализаторы. Компромиссным и наиболее часто применяемым является способ подключения анализатора (рис. 9.4, е), который представляет собой комбинацию двух предыдущих и сочетает их положительные возможности.

Для отбора проб анализируемого вещества в специальных случаях находят применение роботы, действующие по жесткой или гибкой программе. Робот 8 (рис. 9.4, ж) с помощью специального захватного устройства 9 обеспечивает доставку пробы анализируемого вещества из технологического потока 1 в автоматический анализатор 2.

§ 9.6. Агрегатный комплекс средств аналитической техники

В настоящее время автоматические анализаторы качества выпускаются в рамках государственной системы приборов (см. гл. 2) в виде отдельных средств измерений и в составе агрегатного комплекса средств аналитической техники (АСАТ). Последний представляет собой систему агрегатных комплексов (называемых подкомплексами АСАТ) средств измерений хи-



Рис. 9.5. Состав подкомплексов агрегатных средств аналитической техники

мического состава, построенных на основе определенного для каждого подкомплекса принципа измерений. Для анализа жидкостей определены следующие подкомплексы АСАТ [12]: фотометрический, кондуктометрический, по-

тенциометрический, полярографический, хроматографический, акустический, диэлектрический, а для анализа газов — следующие подкомплексы АСАТ: хроматографический, рентгеновский, акустический, диэлектрический, тепловой, магнитный. Примерный состав подкомплексов АСАТ показан на рис. 9.5.

Функциональное назначение устройств, входящих в подкомплексы АСАТ, следующее. Устройство формирования пробы служит для отбора анализируемого вещества, его предварительной подготовки (очистки, охлаждения или нагревания и т. п.), принудительной подачи со стабилизированными параметрами (давлением и расходом) в последующее устройство.

Устройство воздействия служит для подвода к анализируемому веществу энергии (тепловой, магнитной, электрической и т. д.) и для стабилизации или изменения значения этой энергии во времени.

Устройство получения информации служит для выполнения измерений по принятому принципу и формирования сигнала измерительной информации. Назначение остальных устройств следует из их названий, приведенных на рис. 9.5.

Устройства формирования пробы, устройства воздействия и устройства получения информации являются устройствами, специфическими для средств измерений химического состава, и полностью разрабатываются в составе АСАТ. Остальные устройства подкомплексов АСАТ заимствуются, как правило, из других агрегатных комплексов ГСП. Изделия подкомплексов АСАТ помимо прямого назначения могут совместно использоваться для построения многопараметрических (см. гл. 12) измерительных систем.

ГЛАВА 10

ИЗМЕРЕНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

§ 10.1. Общие сведения

К числу физико-химических свойств, автоматический контроль которых осуществляется в химико-технологических процессах, относятся плотность, вязкость, коэффициент преломления, давление насыщенных паров, теплота сгорания.

Измерение плотности жидкостей и газов осуществляется для целей управления химико-технологическими процессами и выполнения операций учета количества сырья, топлива, реагентов и готовой продукции.

Для химико-технологических процессов, связанных с производством нефтяных масел, консистентных смазок, полимеров, растворителей, вязкость является показателем, однозначно определяющим качество продукции.

Поэтому ее автоматическое измерение позволяет создавать очень эффективные системы автоматического управления названными выше процессами.

Для некоторых видов продукции химико-технологических процессов требуется измерение коэффициента преломления как одной из величин, определяющих качество.

Для светлых нефтепродуктов (особенно для авиационных и автомобильных бензинов) одним из важных свойств является давление насыщенных паров (упругость паров), характеризующее склонность нефтепродуктов к образованию паровых пробок в топливных системах двигателей.

Для жидких однокомпонентных веществ значение давления насыщенных паров может использоваться в качестве характеристики их чистоты.

Теплоценность жидких и газообразных топлив, используемых в огневых нагревательных и реакционных аппаратах химико-технологических процессов, определяется теплотой их сгорания. Автоматическое измерение этого физико-химического свойства в настоящее время приобретает чрезвычайно важное значение в связи с проводимыми мероприятиями по экономии топливно-энергетических ресурсов.

§ 10.2. Средства измерений плотности жидкостей и газов

Плотностью ρ вещества называют физическую величину, определяемую отношением массы m вещества к занимаемому им объему V :

$$\rho = m/V, \text{ [ед. массы]/[ед. объема]}. \quad (10.1)$$

Удельным весом γ вещества называют физическую величину, определяемую отношением веса G вещества к занимаемому им объему V :

$$\gamma = G/V, \text{ [ед. силы]/[ед. объема]}. \quad (10.2)$$

Удельный вес и плотность связаны соотношением

$$V = \rho g = mg/V, \quad (10.3)$$

где g — местное ускорение свободного падения.

В то время как плотность тела не зависит от его местонахождения на поверхности Земли, удельный вес изменяется в зависимости от расположения тела на земном шаре (в пределах нашей страны более чем на 0,3%). Поэтому справочные данные составляют по плотности.

В некоторых случаях используется понятие относительной плотности, определяемое как отношение плотности данного вещества к плотности другого (условного) вещества при определенных физических условиях.

Относительную плотность жидкого вещества принято выражать отношением его плотности, взятой при нормальной температуре (20 °С), к плотности дистиллированной воды при температуре 4°С и обозначить ρ_{4}^{20} .

Относительную плотность газа принято выражать отношением его плотности к плотности сухого воздуха, взятых при нормальных условиях (нормальная температура — 293,15 К, нормальное давление — 101 325 Па = 760 мм рт. ст.).

Плотность жидкостей и газов уменьшается с увеличением температуры. Плотность газов увеличивается с увеличением давления, плотность жидкости практически от давления не зависит. Во многих важных для практики случаях плотность можно рассматривать как аддитивное физическое свойство (см. гл. 11).

Средства измерений плотности часто называют плотномерами или денсиметрами (денситометрами) (от лат. *densus* — плотный, густой и от греч. *metreo* — измеряю),

Для измерения плотности в настоящее время применяются плотномеры весовые, поплавковые, гидроаэростатические, гидрогазодинамические, рздиоизотопные, акустические, вибрационные и др. [20].

Далее рассмотрены наиболее широко применяемые автоматические плотномеры жидкостей и газов.

Весовые, или пикнометрические (от греч. *pykno* — плотный), **плотномеры**. Принцип действия этих механических плотномеров (см. табл. 9.1) состоит в непрерывном взвешивании постоянного объема анализируемого вещества в некоторой емкости или трубопроводе, т. е. в соответствии с выражениями (10.1) — (10.3) плотность определяется через удельный вес.

Наиболее распространен плотномер жидкостей, схема которого показана на рис. 10.1, а.

Чувствительным элементом плотмера служит U-образная трубка 7, изготовленная из нержавеющей стали, соединенная через тягу 3 с рычагом 4. Концы трубки 7 через сильфоны 2

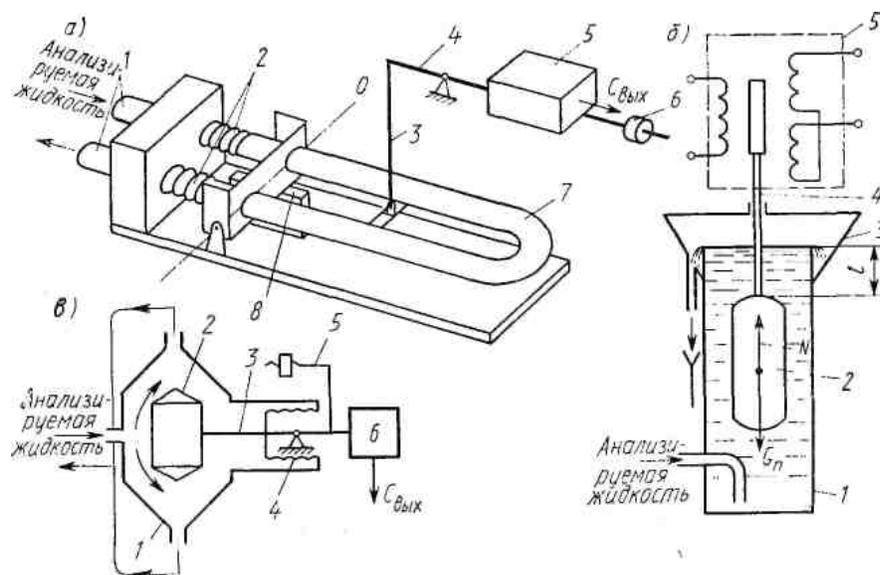


Рис. 10.1. Схемы весовых и поплавковых плотномеров жидкостей

соединены с неподвижными патрубками 1, через которые подается анализируемая жидкость. Наличие сильфонов 2 позволяет трубке 7 поворачиваться вокруг оси $O — O$. При увеличении плотности жидкости увеличивается масса трубки с жидкостью, что через рычаг 4 передается к механоэлектрическому или механо пневматическому преобразователю 5, построенному по принципу компенсации сил (см. гл. 5), выходной сигнал $C_{\text{вых}}$ которого пропорционален изменению плотности анализируемой жидкости. Противовес 6, укрепленный на рычаге 4, служит для уравнивания момента сил, создаваемого трубкой 7 с жидкостью при выбранном нижнем пределе измерения плотности. Устройство 8 служит для автоматического введения поправки к сигналу плотмера в зависимости от температуры анализируемой жидкости, которую это устройство непрерывно измеряет.

Плотномеры данной конструкции позволяют измерять плотность в интервале 0,5—2,5 г/см³. При этом может быть установлен диапазон измерений 0,05—0,3 г/см³ в любой части указанного интервала. Максимальная температура анализируемой жидкости 100 °С, классы точности 1—1,5.

Поплавковые, или ареометрические (от греч. — *araios* жидкий и *metreo* измеряю), плотномеры. Принцип действия этих механических плотномеров основан на непрерывном измерении выталкивающей (подъемной) силы, действующей на поплавок, частично или полностью погруженный в анализируемое вещество.

На рис. 10.1, б показана схема поплавкового плотнера жидкостей с частично погруженным поплавком 2, который размещен в емкости 1. Через эту емкость непрерывно прокачивается анализируемая жидкость. За счет перелива в емкости поддерживается постоянный уровень. Анализируемая жидкость удаляется из плотнера через сборник 3. При изменении плотности жидкости изменяется степень погружения поплавка 2 в емкость. Достижение положения равновесия сил N и $G_{\text{п}}$ обеспечивается при этом изменением длины l стержня 4, погруженного в жидкость. Перемещение поплавка 2 преобразуется в электрический сигнал с помощью дифференциального трансформатора 5.

Вес поплавка 2 со стержнем 4 (в воздухе) $G_{\text{п}}$ и выталкивающая сила N , действующая на поплавок, описываются выражениями

$$G_{\text{п}} = mg, \quad (10.4)$$

$$N = (V + lS)\rho g, \quad (10.5)$$

где m — масса поплавка и стержня; V — объем поплавка; l — длина участка стержня, погруженного в жидкость; S — площадь поперечного сечения стержня.

При равенстве сил $G_{\text{п}}$ и N из выражений (10.4) и (10.5) с учетом действия на стержень на поверхности раздела фаз сил поверхностного натяжения

$$l = (m - V\rho + A)/S\rho, \quad (10.6)$$

где A — постоянная для данной жидкости величина, учитывающая поверхностное натяжение.

Как видно из (10.6), длина l , а следовательно, и сигнал дифференциального трансформатора 5 однозначно связаны с плотностью жидкости. Массу m подбирают в зависимости от диапазона измерений.

Существует много различных конструкций плотномеров с частично погруженным поплавком [20, 21]. Они обладают высокой чувствительностью, что позволяет осуществлять измерение плотности в узком диапазоне (всего 0,005—0,01 г/см³) с погрешностью $\pm(1,5—3)\%$ от диапазона измерений. На рис. 10.1, в показана схема поплавкового плотнера жидкостей с полностью погруженным поплавком 2. Последний размещен в камере 1, через кото-

рую прокачивается анализируемая жидкость. Изменение выталкивающей силы, действующей на поплавок, при прочих постоянных условиях пропорционально изменению плотности жидкости. Поплавок укреплен на рычаге 3, герметичность вывода которого из камеры 1 обеспечивается сифоном 4. Момент на рычаге 3, создаваемый выталкивающей силой при значении плотности, соответствующем нижнему пределу измерений, уравнивается моментом, создаваемым противовесом 5. Изменение выталкивающей силы преобразуется преобразователем силы 6 в унифицированный пневматический или электрический сигнал $C_{\text{Вых}}$. Плотномеры данной конструкции позволяют измерять плотность от 0,5 до 1,2 г/см³. Диапазон измерений может быть установлен от 0,05 до 0,2 г/см³ в любой части указанного интервала. Температура анализируемой жидкости может составлять $-5 \div + 110^\circ\text{C}$. Класс точности 1.

Гидро- и аэростатические плотномеры. Принцип действия этих механических плотномеров основан на зависимости давления P столба анализируемой жидкости или газа от плотности ρ этих сред:

$$P = \rho gH, \quad (10.7)$$

где H — высота столба жидкости или газа.

Если значение H принять постоянным, то давление P однозначно определяется плотностью среды:

$$P = k\rho, \quad (10.8)$$

где $k = gH$ — постоянный коэффициент.

На рис. 10.2, а приведена схема гидростатического плотномера жидкости. В данном измерительном устройстве анализируемая жидкость непрерывно прокачивается через камеру 1, в которой на опорной плате 9 размещены измерительные сифоны 2 и 4. Расстояние между этими сифонами по высоте составляет H , поэтому на сифон 2 действует большее гидростатическое давление, чем на сифон 4. Указанные сифоны и сифон 3 заполнены вспомогательной жидкостью. Сифон 3 служит для температурной компенсации и по существу представляет собой жидкостный манометрический термометр. Разность усилий на сифонах 2 и 4, возникающая за счет разности гидростатических давлений на них, создает на измерительном рычаге 8 вращающий момент, который через рычаг 7 передается в преобразователь 5 силы в унифицированный электрический или пневматический сигнал. Мембрана 6 обеспечивает герметичный вывод рычага 7. Основные технические характеристики: диапазон измерений от 0—0,05 до 0—0,5 г/см³; максимальная температура жидкости 200°C; класс точности 1.

Схема гидростатического плотномера, принцип действия которого основан на измерении гидростатического давления путем продувки сжатого газа, показана на рис. 10.2, б. Такие плотномеры используются в химико-технологических процессах для измерения плотности непосредственно в технологических аппаратах. В аппа-

рате 7 установлены трубки 1 и 2 с различной глубиной погружения. Газ (обычно воздух) от регулятора расхода 5 поступает к пневматическим дросселям 3 и 4, а затем к трубкам 2 и 1. Через открытые торцы трубок газ барботирует через жидкость. Давление газа в трубках 1 и 2 определяется гидростатическим давлением столба

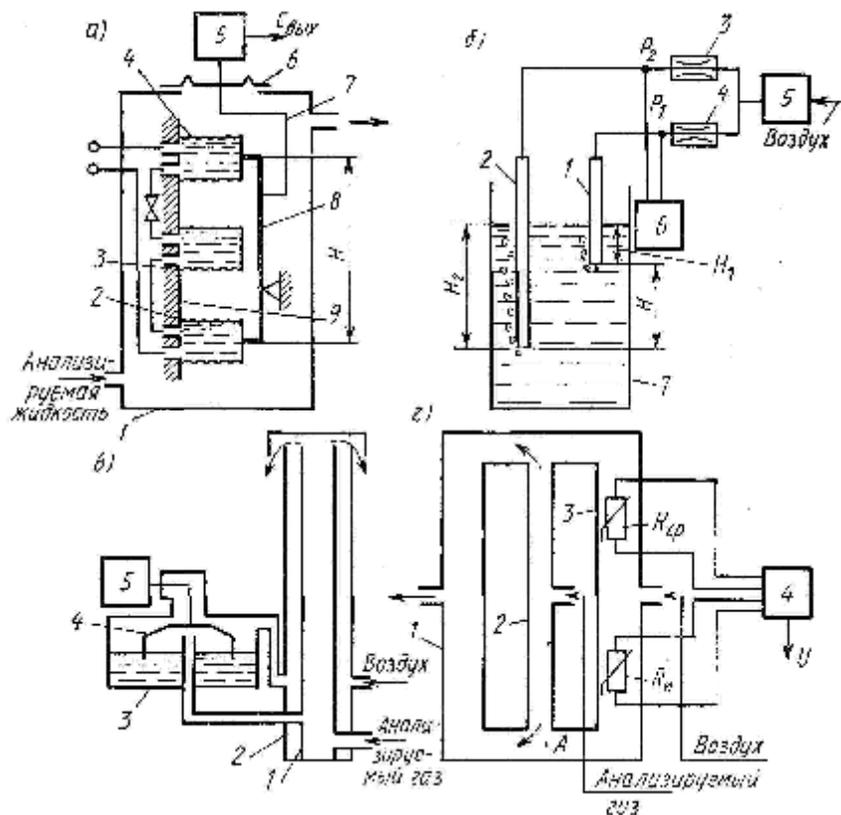


Рис. 10.2. Схемы гидро- и газостатических плотномеров жидкостей и газов

жидкостей высотой H_1 и H_2 (см. гл. 8). Разность давлений в трубках измеряется дифманометром б с пневматическим или электрическим выходным сигналом. Этот перепад определяется выражением

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho g H_2 - \rho g H_1 = (H_2 - H_1) \rho g = H \rho g. \quad (10.$$

9)

Наличие двух трубок позволяет исключить влияние на результат измерений возможных изменений уровня жидкости в аппарате.

Схема широко распространенного аэростатического плотномера газов показана на рис. 10.2, в. В этом плотномере анализируемый газ и воздух прокачиваются при постоянных давлениях соответ-

венно через вертикальные трубки 1 и 2, внутренние полости которых образуют столбы анализируемого газа и воздуха одинаковой высоты. Разность аэростатических давлений этих столбов измеряется с помощью высокочувствительного колокольного дифманометра 3, работающего по принципу уравнивания за счет изменения выталкивающей силой (см. гл. 4). Перемещение колокола 4 дифманометра с помощью преобразователя 5 преобразуется в унифицированный электрический или пневматический сигнал. Плотномер обеспечивает измерение плотности от 0 до 3 кг/м³ с диапазоном измерений от 0,2 до 1 кг/м³ и с погрешностью ±0,01 кг/м³.

Одним из наиболее совершенных и чувствительных является плотномер (рис. 10.2, з), в котором используется комбинация механического и теплового эффектов. Анализируемый газ с постоянным объемным расходом поступает в трубку 2, а в трубку 3 при постоянном давлении поступает вспомогательный газ (обычно воздух). Газовые потоки выводятся через трубку 1. Трубки 1, 2 и 3 расположены вертикально. При изменении плотности анализируемого газа изменяется аэростатическое давление столба газа в трубке 2, а следовательно, и давление в точке А. Поэтому изменяется расход воздуха, омывающего резисторный измерительный термоанемометр R_n (см. § 7.8), в результате чего изменяется его сопротивление. Сопротивление сравнительного термоанемометра R_{cp} остается постоянным, так как омывающий его поток воздуха практически не изменяется. Изменение сопротивления термоанемометра R_n вызывает разбаланс U неравновесного моста 4. Этот разбаланс описывается выражением [22]:

$$U = K(\rho - \rho_v), \quad (10.10)$$

где K — коэффициент преобразования плотномера; ρ_v — плотность воздуха.

Плотномер термостатируется при температуре 40 или 45°C, обеспечивает измерение плотности в пределах 0—3 кг/см³ с диапазоном измерений, отсчитанным от значения плотности воздуха при 20°C, ± (0,01 ÷ 1,5) кг/м³ и классами точности 2—5 (в зависимости от диапазона измерений).

Гидро-газо(аэро)динамические плотномеры. Принцип действия этих механических плотномеров основан на сообщении потоку анализируемого вещества дополнительной кинетической энергии и на измерении параметров, характеризующих эффекты, возникающие при этом воздействии. В основном указанные плотномеры применяются для измерения малой по значению плотности газов.

На рис. 10.3 показаны упрощенные схемы газодинамических плотномеров газов. В плотномере (рис. 10.3, а) потоку анализируемого газа, протекающего через камеру 2, сообщается кинетическая энергия турбинкой 3, приводимой во вращательное движение синхронным двигателем 1. Поток газа поступает к турбинке 4 и соз-

дает на ней за счет своей кинетической энергии вращающий момент, определяемый формулой

$$M = k\omega^2\rho, \quad (10)$$

11)

или

$$P_1 - P_2 = k\rho, \quad (10)$$

12)

где k — постоянный коэффициент, ω — частота вращения турбинки 3.

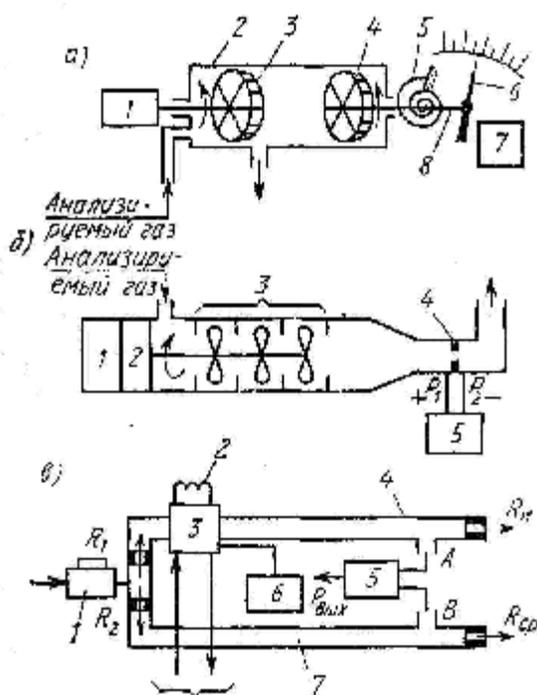


Рис. 10.3. Схемы газодинамических анализировать газ прокачивается с постоянным объемным расходом Q , создаваемым трехступенчатым

вентилятором 3, через диафрагму 4 диаметром 0,5—1 мм. Вентилятор приводится во вращательное движение через магнитную муфту 2 синхронным двигателем или пневматической турбинкой /. Перепад давлений (50—500 Па), возникающий на диафрагме 4, измеряется дифманометром 5 с унифицированным сигналом.

В соответствии с выражениями (7.23), (7.25) этот перепад давлений $P_1 - P_2 = 0,5[Q/(\alpha\varepsilon F_0)]^2\rho$. (10)

13)

Плотномер способен измерять плотность газа в нормальных и рабочих условиях. Класс точности его 1.

Плотномер (рис. 10.3, в) является устройством циклического действия и работает в импульсном режиме (см. гл. 9). Он представляет собой пневматический неравновесный мост, составленный из четырех диафрагм (турбулентных пневмосопротивлений), два

из которых $R_{и}$ и R_1 включены в измерительную 4, а два других $R_{ср}$ и R_2 — в сравнительную 7 ветвь моста. Через обе ветви моста все время протекает сухой воздух (газ-носитель), поступающий от регулятора давления 1. При этом перепад давления между точками A и B моста равен нулю. В дозатор 3 все время поступает анализируемый газ, промывая дозируемый объем 2. Периодически по сигналу командного прибора 6 каналы дозатора переключаются (см. гл. 12) так, что дозируемый объем отключается от линии анализируемого газа, а к нему подключается линия подачи газа-носителя. Газ-носитель начинает выталкивать отобранный объем газа через измерительную ветвь 4 и турбулентное пневмосопротивление $R_{и}$ в атмосферу. При этом давление в точке A изменяется, а в точке B остается постоянным. Разность давления между точками A и B описывается выражением

$$\Delta P = k(\rho - \rho_{в}), \quad (10.14)$$

где k — постоянный коэффициент.

Перепад давлений на измерительной диагонали AB моста измеряется дифманометром 5 с унифицированным выходным сигналом. Сигнал плотномера практически не зависит от изменений окружающей температуры и давления. Продолжительность одного цикла работы 3 мин. Плотномер обеспечивает измерение плотности от 0 до 3 кг/м³ с диапазонами измерений, отсчитанными от значения плотности воздуха при 20°C и равными от $\pm 0,1$ до $\pm 1,5$ кг/м³. Классы точности 2—3 (в зависимости от диапазона измерений).

Вибрационные плотномеры. Принцип действия этих механических плотномеров основан на зависимости параметров упругих колебаний (вибрация), сообщаемых камере с анализируемым веществом или телу, размещенному в нем, от плотности этого вещества. Обычно в качестве параметра упругих колебаний используется частота собственных колебаний резонатора, находящегося в режиме автоколебаний. Резонаторы вибрационных плотномеров выполняют в виде трубки, пластины, стержня, струны, камертона и т. д. Частота собственных колебаний резонатора, заполненного или находящегося в анализируемом веществе, описывается в общем случае выражением

$$f = f_0 \sqrt{1/(1 + k\rho)}, \quad (10.15)$$

где f_0 — частота колебаний резонатора при начальном значении плотности анализируемого вещества; k — константа, зависящая от конструкции резонатора.

Конструктивно различают проточные и погружные вибрационные плотномеры. В первых анализируемое вещество протекает через внутреннюю полость резонатора, во вторых — резонатор размещается в потоке анализируемого вещества.

На рис. 10.4, *a* показана схема проточного вибрационного плотномера жидкостей. Анализируемая жидкость поступает параллельно в трубки 1 и 2 (резонатор), установленные в сильфонах 6

и скрепленные перемычками 8. Сильфоны 6 расположены в опорах 5. Указанные трубки, катушка 3, воспринимающая колебания трубок резонатора, катушка возбуждения 4 и электронный усилитель 10 составляют электромеханический генератор, частота колебаний которого определяется плотностью анализируемой жидкости. Выходной сигнал усилителя 10 в виде частоты вводится в вычислительное устройство 9, к которому подключены платиновые термометры сопротивления 7 и 11, позволяющие корректировать сигнал плотномера в зависимости от значения средней температуры жидкости в нем. Диапазон измерений данного плотномера $690—1050 \text{ кг/м}^3$, температура жидкости $10—100^\circ\text{C}$; абсолютная погрешность измерения $\pm 1,5 \text{ кг/м}^3$.

На рис. 10.4, б показана схема погружного камертонного вибрационного плотномера газов. Здесь электромеханический генератор состоит из воспринимающих катушек 2

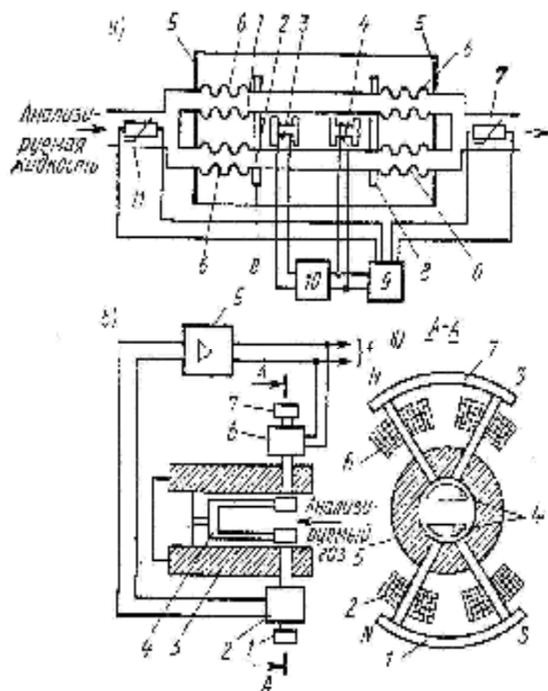


Рис. 10.4. Схемы вибрационных плотномеров жидкостей и газов

с магнитом 1, катушек возбуждения 6 с магнитом 7, камертона 4, расположенного в корпусе 3, и электронного усилителя 5. Частота колебаний системы на выходе усилителя 5 сравнивается с частотой кварцевого генератора, а разность частот этих колебаний, определяющих плотность

газа, измеряется частотомером. Класс точности плотномера 1. Он может быть использован для измерения плотности газа в рабочих условиях.

§ 10.3. Средства измерений вязкости жидкостей

Вязкость (внутреннее трение) — свойство текучих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой. Основной закон вязкого течения описывается формулой Ньютона:

$$F = \eta S \frac{dW}{dn}, \quad (10.16)$$

где F — тангенциальная (касательная) сила, вызывающая сдвиг слоев жидкости (газа) друг относительно друга; S — площадь слоя, по которому происходит сдвиг; dW/dn — градиент скорости W течения (быстроты изменения ее от слоя к слою) по нормали n .

Коэффициент пропорциональности η называют *динамической вязкостью*. Он характеризует сопротивление жидкости (газа) смещению ее слоев. Величину, обратную динамической вязкости $\varphi = 1/\eta$, называют *текучестью*. Наряду с понятием динамической вязкости используют понятие кинематической вязкости:

$$\nu = \eta/\rho, \quad (10.17)$$

Единица динамической вязкости в СИ — Па·с, в системе СГС—П (пуаз); единица кинематической вязкости в СИ — м²/с, в системе СГС—ст (стокс). Соотношение между названными единицами: 1П = 10⁻¹ Па·с; 1ст = 10⁻⁴ м²/с

Вязкость жидкостей с увеличением температуры уменьшается, а газов — увеличивается. Динамическая вязкость до давлений 20 МПа практически не зависит от давления. Вязкость в общем случае не является аддитивным физическим свойством.

Средства измерений вязкости называют *вискозиметрами*. На химико-технологических процессах вискозиметры используются только для измерения вязкости жидкостей. В настоящее время разработаны автоматические капиллярные, ротационные, вибрационные вискозиметры, вискозиметры с падающим телом и др. [23]. Далее рассмотрены вискозиметры, наиболее часто применяемые в химико-технологических процессах.

Капиллярные вискозиметры (вискозиметры истечения). Принцип действия этих механических вискозиметров основан на закономерности истечения жидкости через капилляр, описываемой законом Пуазейля:

$$Q = \frac{\pi d^4}{128\eta l} (P_1 - P_2), \quad (10.18)$$

где Q — объемный расход жидкости; d и l — внутренний диаметр и длина капилляра; P_1, P_2 — давление до и после капилляра по потоку.

при постоянном объемном расходе жидкости выражение (10.18) можно преобразовать к виду

$$P_1 - P_2 = k\eta, \quad (10.19)$$

где $k = 128lQ/(\pi d^4)$ - постоянный коэффициент для принятого расхода жидкости.

Из (10.19) следует, что для измерения динамической вязкости достаточно при постоянном объемном расходе жидкости измерять перепад давлений на капилляре.

На рис. 10.5, а показана схема капиллярного вискозиметра, в котором для создания постоянного объемного расхода анализируемой жидкости используется шестеренчатый насос

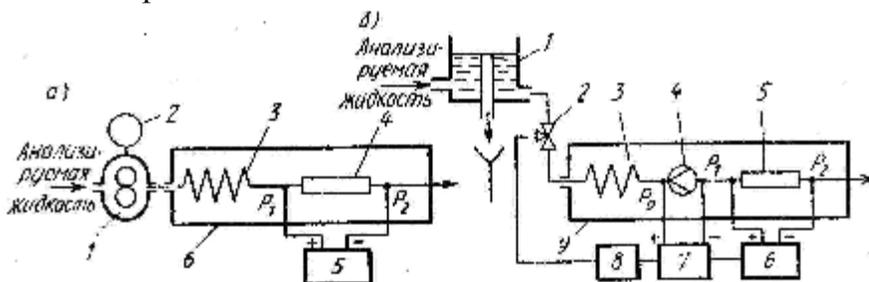


Рис. 10.5. Схемы капиллярных вискозиметров

1, приводимый в движение синхронным двигателем 2. Из насоса анализируемая жидкость поступает в змеевик 3, где нагревается до температуры масла, заполняющего термостат б, а затем в капилляр 4, размеры которого выбирают в зависимости от диапазона измеряемых значений вязкости. Перепад давлений на капилляре измеряется дифманометром 5 с пневматическим или электрическим унифицированным выходным сигналом, который пропорционален динамической вязкости анализируемой жидкости. Температура в термостате поддерживается постоянной и равняется 50 или 100°C. Диапазоны измерений от $(0 \div 2) \cdot 10^{-3}$ Па·с до $(0 \div 1000) \cdot 10^{-3}$ Па·с. Классы точности вискозиметра 1,5-2,5 (в зависимости от диапазона измерений).

В вискозиметре, представленном на рис. 10.5, б, стабилизация объемного расхода анализируемой жидкости осуществляется пневматической системой автоматического регулирования состоящей из диафрагмы 4, дифманометра 7, пневматического регулятора 8 и исполнительного механизма 2. Анализруемая жидкость подается из напорной емкости 1 с переливной трубкой. Возможность стабилизации расхода жидкости таким способом базируется на том, что перепад давлений на диафрагме ($P_0 - P_1$) практически не зависит от динамической вязкости, а плотность анализируемой жидкости (например, нефтяных масел) изменяется незначительно.

При таких условиях поддержание постоянного перепада давления ($P_0 - P_1$) обеспечивает постоянство объемного расхода анализируемой жидкости. Змеевик 3, диафрагма 4 и капилляр 5 размещены в водяном термостате 9, где поддерживается температура, равная 100°C , за счет подачи в него насыщенного водяного пара при атмосферном давлении. Перепад давления $P_1 - P_2$ на капилляре измеряется дифманометром 6 с пневматическим выходным сигналом. Класс точности вискозиметра 2,5.

Вискозиметры с падающим телом (шариковые вискозиметры).

Принцип действия этих механических вискозиметров основан на измерении скорости (или времени) движения тела (шарика) под действием сил тяжести и трения в анализируемой жидкости.

Это движение описывается законом Стокса:

$$W = \frac{2}{9} \frac{g(\rho_{\text{ш}} - \rho)r^2}{\eta}, \quad (10.20)$$

где W — скорость равномерного падения шарика; $\rho_{\text{ш}}$ — плотность материала шарика ($\rho_{\text{ш}} > \rho$); r — радиус шарика.

Если учесть, что плотность анализируемой жидкости изменяется незначительно и что она в несколько раз меньше плотности шарика, то выражение (10.20) можно преобразовать к виду

$$W = k_1/\eta, \quad (10.21)$$

где $k_1 = \frac{2}{9} g(\rho_{\text{ш}} - \rho)r^2$ — постоянный коэффициент.

Обычно измерение скорости W сводится к измерению отрезка времени τ , за который шарик, падая с постоянной скоростью, проходит некоторый постоянный отрезок пути l между двумя принятыми отметками. В этом случае

$$\tau = l/W = l\eta/k_1 = k\eta, \quad (10.22)$$

где $k = l/k_1$ — постоянный коэффициент.

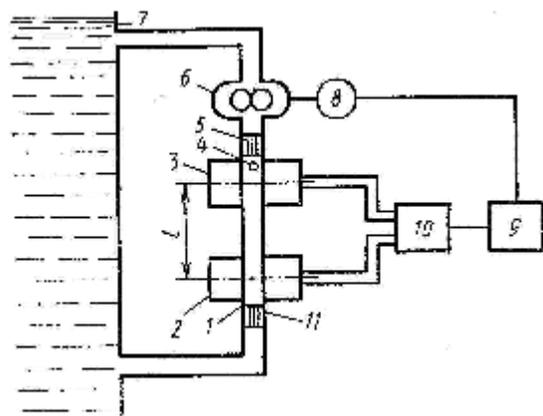


Рис. 10.6. Схема шарикового вискозиметра

циклического действия. На рис. 10.6 показана схема шарикового вискозиметра циклического действия. Анализируемая жидкость из аппарата 7 или трубопровода прокачивается насосом 6 по трубке 1 из немагнитного материала снизу вверх и при своем движении поднимает шарик 4 от нижней 11 до верхней 5 ограничительной сетки. При выключении двигателя 8 насоса (периодическое включение

и выключение осуществляются блоком управления 9) шарик падает в анализируемую жидкость. С помощью дифференциальных трансформаторов (см. гл. 5) 3 и 2 формируются электрические импульсы в моменты времени, когда шарик проходит две выбранные отметки, отстоящие друг от друга по высоте трубки на расстояние l . С помощью измерителя временных интервалов 10 измеряется отрезок времени между указанными импульсами, значение которого и определяет динамическую вязкость. Класс точности вискозиметра 2.

Известны конструкции вискозиметров с падающим телом непрерывного действия [23].

Ротационные вискозиметры. Принцип действия этих механических вискозиметров основан на измерении крутящего момента, возникающего на оси ротора (цилиндра, диска и т. п.), погруженного в измеряемую среду, при взаимном их перемещении. Указанный крутящий момент в общем случае описывается выражением

$$M = k\omega\eta, \quad (10.23)$$

где k — постоянный коэффициент, зависящий от конструкции ротора вискозиметра; ω — угловая скорость вращения ротора (при постоянной угловой скорости крутящий момент однозначно определяет вязкость жидкости).

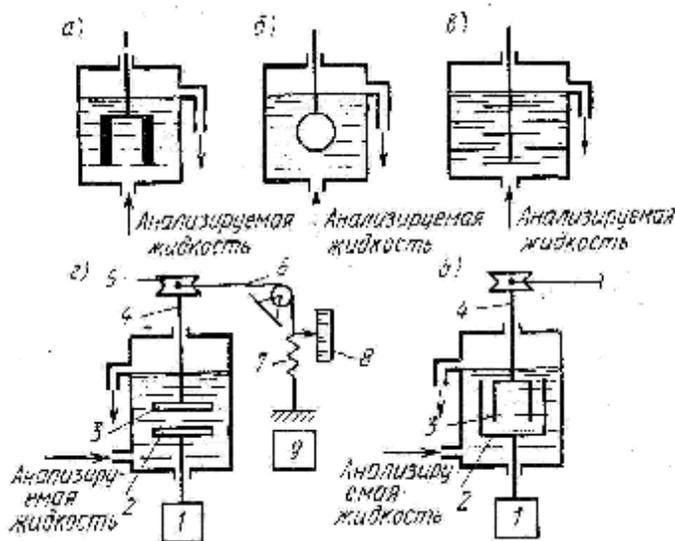


Рис. 10.7. Схемы ротационных вискозиметров

Из большого многообразия конструкций вращающихся элементов ротационных вискозиметров в автоматических анализаторах обычно используются конструкции, показанные на рис. 10.7. Вискозиметры, представленные на рис. 10.7, а—в, объединяет общий принцип действия, в соответствии с которым вязкость определяет-

ся по моменту сил трения, возникающему при вращении тела, погруженного в анализируемую жидкость. Таким телом может быть цилиндр (рис. 10.7, а), шар (рис. 10.7, б) или диски, посаженные на общий вал и расположенные между неподвижными шайбами (рис. 10.7, в). В вискозиметрах момент вращения, создаваемый диском (рис. 10.7, з) или цилиндром 2 (рис. 10.7, д), передается через жидкость диску или цилиндру 3. Диску или цилиндру вращательное движение сообщается синхронным двигателем 1. Вращающий момент, возникающий на диске (цилиндре) 3, а следовательно, на шкиве 5, насаженном на одном валу 4 с диском (цилиндром) 3, пропорционален динамической вязкости. Этот момент уравнивается силой упругой деформации пружины 7, соединенной с гибкой нитью о, которая прикреплена к шкиву 5. Значение деформации пружины можно наблюдать по шкале 8. С помощью преобразователя 9 сила упругой деформации пружины 7 преобразуется в унифицированный электрический или пневматический сигнал.

Характерной особенностью ротационных вискозиметров является широкий диапазон измеряемых значений вязкости (0,01—1000 Па·с). Классы точности ротационных вискозиметров 1—2,5.

§ 10.4. Средства измерений показателя преломления жидкостей

Измерение показателя (или коэффициента) преломления (рефракции) осуществляется интерферометрами и рефрактометрами (от лат. *refractus*— преломленный и от греч. *metreo* — измеряю). Для автоматических измерений обычно используются рефрактометры,

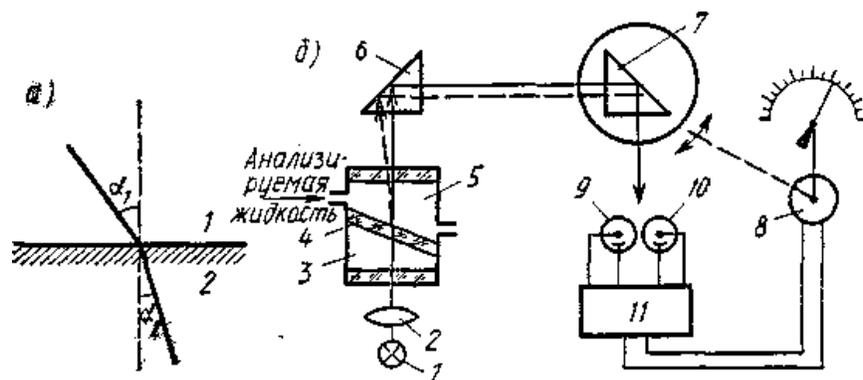


Рис. 10.8. Схема рефрактометра

относящиеся к оптическим средствам измерений (см. табл. 9.1). Принцип действия их основан на законе преломления света, согласно которому часть световой энергии луча, падающего на границу раздела прозрачных сред 1 и 2 (рис. 10.8, а), возвращается в

среду I^* , а остальная часть проходит в среду 2 и при этом меняет направление. Математический закон преломления выражается зависимостью

$$\sin\alpha_1/\sin\alpha_2 = n_{21}, \quad (10.24)$$

где α_1 и α_2 — углы падения и преломления светового луча; n_{21} — константа, называемая *относительным показателем преломления* вещества 2 по отношению к веществу 1.

В соответствии с волновой теорией света показатель преломления определяет отношение скоростей W_1 и W_2 распространения световых волн в двух средах:

$$n_{21} = W_1/W_2. \quad (10.25)$$

Из двух сред та, в которой свет распространяется с большей скоростью, называется средой, оптически менее плотной, а среда, в которой скорость света меньше, называется оптически более плотной.

Коэффициент преломления жидкостей практически не зависит от давления, а изменение его с изменением температуры для огромного большинства жидкостей лежит в пределах 0—0,0006 1/град. Для многих практически важных случаев коэффициент преломления жидкостей можно рассматривать как аддитивное физико-химическое свойство.

На рис. 10.8, б показана схема рефрактометра. Свет от лампы 1 через оптическую систему 2 в виде луча посылается в так называемую дифференциальную кювету 4. Последняя состоит из двух частей, отделенных друг от друга стеклянной перегородкой. Через измерительную камеру 5 кюветы непрерывно прокачивается анализируемая жидкость, а сравнительная камера 3 заполнена образцовой жидкостью. При равенстве показателей преломления этих жидкостей луч от лампы проходит через обе камеры без отклонений. Изменение показателя преломления анализируемого вещества вызывает отклонение луча, пропорциональное разности показателей преломления анализируемого и образцового веществ. Луч света из кюветы попадает в неподвижную 6 и подвижную 7 призмы. Когда он не испытывает отклонений, фотоэлементы 9 и 10, включенные встречно и образующие дифференциальный фотоприемник, освещены одинаково. На выходе электронного усилителя 11 сигнал равен нулю. При отклонении луча возникает различие в освещенности этих фотоэлементов. Сигнал на входе электронного усилителя 11 становится отличным от нуля. Этот сигнал усиливается и управляет работой реверсивного двигателя 8, который через механическую передачу поворачивает призму 7 до тех пор, пока освещенности фотоэлементов 9 и 10 опять не станут одинаковыми. Поло-

* Анализаторы, работа которых базируется на использовании отраженного луча для получения измерительной информации, называют рефлектометрами (от лат *reflectere* — отражатель и от греч. *metreo* — измеряю).

жение ротора двигателя δ и связанное с ним положение стрелки на шкале определяют разность коэффициентов преломления анализируемого и образцового веществ. Рефрактометр обычно снабжен устройством коррекции показаний в зависимости от температуры анализируемой среды.

Диапазон измерений разности показателей преломления между анализируемой или образцовой жидкостью от $(0 \div 0,02) 10^{-2}$ до $(0 \div 10) 10^{-2}$. Классы точности 1,5 – 4 (в зависимости от точности измерений).

§ 10.5. Средства измерений давления насыщенных паров жидкостей

Давление насыщенных паров (упругость паров) является одним из важных показателей качества светлых нефтепродуктов, особенно автомобильных и авиационных бензинов. Давление насыщенных паров характеризует их испаряемость и склонность к образованию паровых пробок, а также может использоваться в качестве характеристики чистоты жидких однокомпонентных веществ. Давление насыщенных паров существенно зависит от температуры. На рис. 10.9, а показана схема первичного измерительного преобразователя упругости паров жидкостей, который может быть установлен непосредственно на технологическом аппарате. По принципу действия он является механическим средством

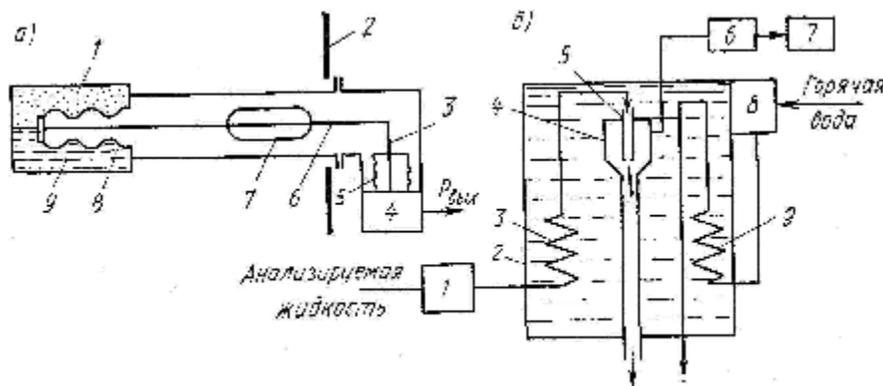


Рис. 10.9. Схемы анализаторов давления насыщенных паров

измерения. Чувствительный элемент анализатора — сильфон δ заключен в кожух I из тонкой листовой меди. Пространство между кожухом I и сильфоном δ заполнено образцовой жидкостью 9 , которая по составу должна быть близка к анализируемому веществу. При установке преобразователя на контрольной тарелке (по качеству продукта на которой проводится процесс) ректификационной колонны 2 сильфон δ находится под одновременным воздействием давления паров в ко-

лонне, поступающих во внутреннее пространство через отверстие 7, и давления паров образцовой жидкости 9. Усилие на сильфоне 8, возникающее под действием этой разности давлений, через шток 6, рычаг 3 и уплотнительный сильфон 5 передается к преобразователю 4 силы в унифицированный пневматический сигнал. Этот сигнал пропорционален разности давлений насыщенных паров анализируемой и образцовой жидкостей при температуре аппарата. Диапазоны измерений от 0—1000 до 0—64000 Па; классы точности 1 и 1,5; постоянная времени 40 с; диапазон рабочих температур 0—150°С.

Схема механического анализатора упругости паров бензинов показана на рис. 10.9, б. Анализируемая жидкость поступает в блок подготовки 1, из которого с постоянным объемным расходом она подается в змеевик 3, расположенный в термостате 2, заполненном антифризом. Здесь путем подачи горячей воды в змеевик 9 с помощью регулятора 8 поддерживается постоянная температура, равная 38°С (при этой температуре по действующим стандартам определяется давление насыщенных паров бензинов). Из змеевика 3 анализируемая жидкость, нагретая до 38°С, поступает в сопло 5 струйного насоса. При истечении жидкости из сопла за счет вязкости струя увлекает за собой пары жидкости, находящейся в камере 4 струйного насоса, поэтому в названной камере создается разрежение тем большее, чем меньше упругость паров анализируемой жидкости. Измерение разрежения в камере 4 осуществляется вакуумметром 6 с унифицированным пневматическим сигналом, который по пневмопроводу подается вторичному прибору 7.

Диапазон измерений анализатора 250—650 мм рт. ст.; расход анализируемого вещества 800 см³/мин; абсолютная погрешность измерений 15 мм рт. ст.

§ 10.6. Средства измерений теплоты сгорания жидких и газообразных топлив

Теплота сгорания является характеристикой теплоценности топлива.

Под *удельной теплотой сгорания* понимают количество тепловой энергии, выделяющееся при полном сгорании единицы массы или единицы объема топлива. Соответственно различают удельные *массовую и объемную теплоты сгорания*. Информация о теплоте сгорания используется для управления процессом горения в огневых нагревательных аппаратах и для выполнения учетных операций, связанных с потреблением топлив. В качестве топлив на химико-технологических процессах используют мазут, попутный нефтяной и природный газы. Удельная массовая теплота сгорания мазута изменяется незначительно и жестко коррелирована с плотностью мазута. Поэтому автоматическое измерение этой величины можно свести к измерению плотности.

Газообразные топлива могут включать в свой состав помимо углеводородов негорючие компоненты, воздух, азот, диоксид угле-

рода и др., поэтому для определения теплотенности топлив необходимо осуществлять измерение их удельной теплоты сгорания. Для газообразных топлив обычно измеряют удельную объемную теплоту сгорания.

Различают высшую и низшую удельные теплоты сгорания. Под *высшей удельной объемной теплотой сгорания топлива* Q^B понимают количество тепловой энергии, выделившееся при сгорании единицы объема топлива и конденсации водяного пара, содержащегося в продуктах сгорания.

Под *низшей удельной объемной теплотой сгорания топлива* Q^H понимают количество тепловой энергии, выделившееся при сгорании единицы объема топлива без учета энергии, выделяющейся при конденсации водяного пара из продуктов сгорания.

В огневых нагревательных аппаратах для предотвращения конденсации паров воды в дымоходах температура продуктов сгорания обычно составляет 110—130°C. Поэтому теплотенность топлив определяется низшей удельной теплотой сгорания.

Связь между высшей и низшей теплотами сгорания имеет вид

$$Q^B = Q^H + q, \quad (10.26)$$

где q — теплота конденсации водяных паров, образующихся при сгорании единицы объема топлива.

Средства измерений удельной теплоты сгорания называют *калориметрами*. По принципу действия они относятся к термохимическим анализаторам (см. табл. 9.1). На рис. 10.10, *a* приведена схема автоматического калориметра, позволяющего получить информацию о высшей удельной объемной теплоте сгорания газообразных топлив. Работа калориметра основана на измерении количества тепловой энергии, выделяющейся в процессе химической реакции горения анализируемого газа. Последний с постоянным объемным расходом поступает через стабилизатор расхода 5 в горелку 11. Продукты сгорания омывают стенки теплообменника 8, размещенного в корпусе калориметра 7, и передают всю выделяющуюся тепловую энергию дистиллированной воде, которая непрерывно прокачивается через теплообменник. Воды также передается тепловая энергия, выделяющаяся на стенках теплообменника при конденсации паров воды, которые образуются при сгорании углеводородов. Образующийся конденсат собирается с помощью воронки 12 и стекает в емкость 13. Для подачи воды в теплообменник служат замкнутые системы, состоящие из резервуара 1, насоса 2, холодильника 3 и стабилизатора расхода 4. На входе и выходе теплообменника 8 размещены батареи термоэлектрических чувствительных элементов 6 и 10 (по 20 элементов в каждой батарее). Эти батареи включены дифференциально, и с их помощью измеряется разность температур входящего в теплообменник и выходящего из него потоков воды. Сигнал U , поступающий на автоматический потенциометр 9, пропорционален указанной разности

температур Δt , которая в свою очередь пропорциональна высшей удельной объемной теплоте сгорания анализируемого газа:

$$U = k(\Delta t) = k \frac{Q_B Q_G}{Q_B c_B}, \quad (10.27)$$

где k — коэффициент преобразования дифференциальной батареи термоэлектрических чувствительных элементов; Q_G и Q_B — постоянные объемные расходы анализируемого газа и воды; c_B — объемная теплоемкость воды.

За отрезок времени 1—2 ч, в течение которого в емкость 13 собирается достаточное для измерения количество конденсата, можно определить среднее значение низшей объемной теплоты сгорания, используя формулу (10.26). Для этого необходимо вычислить среднее за этот интервал времени значение высшей объемной теплоты сгорания по показаниям потенциометра 9 и измерить количество конденсата.

Расход анализируемого газа 0,15—0,5 м³/ч; диапазон измерений 0—50·10³ кДж/м³; классы точности 1—2.

На рис. 10.10,6 показана схема автоматического калориметра низшей объемной теплоты сгорания газов. Этот калориметр является анализатором циклического действия

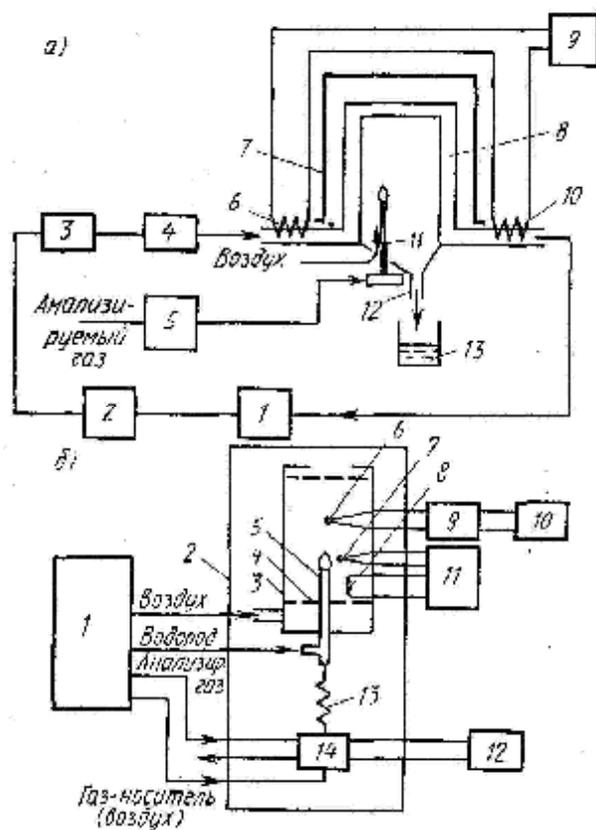


Рис. 10.10. Схемы калориметров

с импульсным вводом пробы анализируемого вещества и может работать в двух режимах: «Подготовка» и «Анализ».

Принцип действия калориметра состоит в измерении температуры газового потока, образующегося при сгорании пробы анализируемого вещества в пламени водорода. Измерение осуществляется с помощью так называемого пламенно-температурного детектора [22]. В камеру 3 этого детектора, расположенного в аналитическом устройстве 2, из блока подготовки газов 1 непре-

рывно подается воздух, а в миниатюрную горелку 5 (внутренний диаметр 0,5 мм) — водород. Кроме того, воздух как газ-носитель непрерывно прокачивается с постоянным объемным расходом через автоматический дозатор 14, колонку (трубку) 13 и горелку 5. В камере 3 распределителем 4 создается равномерный по сечению поток воздуха. Водород сгорает в горелке 5. Для контроля и зажигания пламени водорода служат термоэлектрический чувствительный элемент 7, нихромовая спираль 8 и автомат зажигания пламени 11. В дозатор 14 непрерывно подается анализируемый газ. Температура газообразных продуктов сгорания измеряется термоэлектрическим чувствительным элементом 6, сигнал которого подается на масштабирующий преобразователь 9. Сигнал последнего измеряется автоматическим потенциометром 10. В режиме «Подготовка» в горелке сгорает только водород, а формирующийся при этом сигнал термоэлектрического элемента 6 принимают за начальный уровень сигнала калориметра. Температура потока продуктов сгорания в сечении, в котором располагается термоэлектрический элемент 6, составляет 130—150°C. В этот период происходит продувка дозируемого объема дозатора 14 (см. § 12.3) анализируемым газом. Режим «Подготовка» длится 30—60 с. Затем по команде управляющего устройства 12 дозатор, а с ним и весь калориметр переводятся в режим работы «Анализ». При этом проба анализируемого газа вводится в поток газа-носителя (воздуха) и транспортируется им через колонку 13 в горелку 5. Колонка создает небольшую (15—30 с) задержку в поступлении пробы анализируемого газа из дозатора в горелку. Эта задержка необходима для завершения переходных процессов, возникающих при переключении дозатора. При поступлении пробы анализируемого газа в горелку горючие компоненты ее сгорают в пламени водорода. При этом увеличивается температура потока газообразных продуктов сгорания, измеряемая термоэлектрическим элементом 6. Изменение температуры (обычно несколько градусов) этого потока при постоянных расходах воздуха, водорода, газа-носителя и малом (не более 0,5—2 см³) объеме пробы анализируемого газа пропорционально низшей удельной объемной теплоте сгорания анализируемого газа. Сигнал термоэлектрического элемента имеет форму пика (см. рис. 9.3, б). Амплитуда этого сигнала используется в калориметре в качестве информативного параметра. В последующих циклах работы калориметра все операции повторяются. С помощью запоминающего устройства (на рис. 10.10, б не показано) сигнал преобразователя 9 может быть запомнен на время, равное одному циклу работы калориметра.

Расход анализируемого газа в рассматриваемых калориметрах 0,01 м³/ч; диапазон измерений 0—50·10³ кДж/м³; продолжительность одного цикла работы 200 с; класс точности 2; температура аналитического устройства 50°C.

ГЛАВА 11 ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ

§ 11.1. Теоретические основы анализа состава бинарных и псевдобинарных смесей жидкостей и газов

Измерение концентрации определяемого компонента (см. гл. 9) в бинарных и псевдобинарных смесях жидкостей и газов — одна из наиболее распространенных задач автоматического контроля качества потоков химико-технологических процессов. Для ее решения используется все многообразие физических, физико-химических и химических методов анализа (см. табл. 9.1). В общем случае измерение концентрации определяемого компонента в бинарной смеси осуществляется путем измерения какого-либо физико-химического свойства этой смеси $P_{см}$ и выполнения вычислений, необходимых для решения следующей системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U &= k_{п} P_{см} = k_{п} f(c_0; c_H), \\ 1 &= c_0 + c_H, \end{aligned} \right\} \quad (11.1)$$

где U — сигнал анализатора, используемого для измерения физико-химического свойства смеси; $k_{п}$ — коэффициент преобразования анализатора по физико-химическому свойству; c_0 и c_H — концентрации определяемого и неопределяемого компонентов; f — символ функции.

Из второго уравнения системы (11.1) следует

$$c_H = 1 - c_0. \quad (11.2)$$

С учетом (11.2) первое уравнение системы (11.1) преобразуем к виду

$$U = k_{п} f(c_0; 1 - c_0). \quad (11.3)$$

Из выражения (11.3) следует, что сигнал U измерительного устройства является однозначной и в общем случае нелинейной функцией концентрации определенного компонента.

Во многих важных для практики автоматических измерений случаях с достаточной точностью считают, что физико-химические свойства анализируемой смеси *аддитивны*, т. е. могут быть определены как сумма произведений физико-химических свойств компонентов на их концентрации, выраженные в долях. Обычно используется аддитивность по объемным концентрациям. Если измеряе-

мое физико-химическое свойство аддитивно для смеси, то можно записать

$$\left. \begin{aligned} U &= k_{\Pi} \Pi_{\text{см}} = k_{\Pi} \Pi_0 c_0 + \Pi_{\text{н}} c_{\text{н}}, \\ 1 &= c_0 + c_{\text{н}}, \end{aligned} \right\} \quad (11.4)$$

где Π_0 и $\Pi_{\text{н}}$ — физико-химические свойства определяемого и неопределяемого компонентов, аналогичные свойству смеси.

С учетом (11.2) первое уравнение системы (11.4) преобразуем к виду

$$U = K c_0 + U_0, \quad (11.5)$$

где $K = k_{\Pi}(\Pi_0 - \Pi_{\text{н}})$ — коэффициент преобразования анализатора по концентрации; $U_0 = k_{\Pi} \Pi_{\text{н}}$ — начальный уровень сигнала анализатора.

Измерение концентрации определяемого компонента возможно только при условии

$$\Pi_0 \neq \Pi_{\text{н}},$$

т. е. в том случае, если имеется различие в значениях физико-химических свойств определяемого и неопределяемого компонентов. Чем больше это различие, тем точнее может быть измерена концентрация.

Рассмотренный метод анализа в соответствии с определением, приведенным в § 9.3, является интегральным.

Если для анализа выбрать такое физико-химическое свойство, которое для неопределяемого компонента равно нулю, а для определяемого компонента отлично от нуля, то метод анализа бинарной смеси будет избирательным (см. § 9.3). Для этого случая первое уравнение системы (11.4) имеет вид

$$U = k_{\Pi} \Pi_{\text{см}} = K_{\Pi} \Pi_0 c_0 = K c_0, \quad (11.6)$$

где $K = k_{\Pi} \Pi_0$.

Для измерения концентрации компонента в псевдобинарной смеси (см. § 9.1) осуществляется измерение некоторого физико-химического свойства, по которому многокомпонентная смесь может рассматриваться как бинарная.

Если измеряемое свойство n -компонентной смеси является аддитивным, то можно записать

$$\left. \begin{aligned} U &= k_{\Pi} \Pi_{\text{см}} = k_{\Pi} \Pi_0 c_0 + \sum_{i=1}^{n-1} \Pi_i c_i, \\ 1 &= c_0 + \sum_{i=1}^{n-1} c_i, \end{aligned} \right\} \quad (11.7)$$

где Π_i — физико-химическое свойство i -го неопределяемого компонента; c_i — концентрация i -го неопределяемого компонента.

Многокомпонентную смесь можно рассматривать как псевдо-бинарную в следующих случаях.

Случай 1. Когда физико-химические свойства всех неопределяемых компонентов практически одинаковы и отличаются от одноименного физико-химического свойства определяемого компонента, т. е.

$$\left. \begin{aligned} P_1 \approx P_2 \approx L \approx P_i \approx L \approx P_{n-1} \approx P_H, \\ P_H \neq P_0. \end{aligned} \right\} \quad (11.8)$$

Если рассматривать все неопределяемые компоненты как один, концентрация которого

$$c_H = \sum_{i=1}^{n-1} c_i, \quad (11.9)$$

то, используя (11.8) и (11.9), можно свести систему уравнений (11.7) к системе уравнений (11.4), а ее решение — к выражению (11.5).

Случай 2. Когда неопределяемые компоненты составляют смесь постоянного состава, а изменение физико-химического свойства анализируемой смеси происходит за счет изменений соотношения концентраций определяемого компонента и смеси неопределяемых компонентов, т. е.

$$\begin{aligned} c_2/c_1 = \text{const}; \quad c_3/c_1 = \text{const}; \dots; \quad c_i/c_1 = \text{const}; \dots; \quad c_{n-1}/c_1 = \\ \text{const}, \end{aligned} \quad (11.10)$$

В этом случае смесь неопределяемых компонентов можно рассматривать как один неопределяемый компонент со значением физико-химического свойства P_H и концентрацией c_H . Это позволяет свести анализ такой многокомпонентной смеси к анализу бинарной и результат представить выражением (11.5).

Случай 3. Когда физико-химические свойства всех неопределяемых компонентов анализируемой смеси ничтожно малы по сравнению с физико-химическими свойствами определяемого компонента или вообще равны нулю, т. е. справедливо одно из двух условий:

$$\left. \begin{aligned} P_1 \ll P_0; P_2 \ll P_0; L; P_i \ll P_0; L; P_{n-1} \ll P_0; \dots, \\ P_0 \neq 0. \end{aligned} \right\} \quad (11.11)$$

$$\left. \begin{aligned} P_1 = 0; P_2 = 0; L; P_i = 0; L; P_{n-1} = 0; \dots, \\ P_0 \neq 0. \end{aligned} \right\} \quad (11.12)$$

Этот случай соответствует избирательному анализу, а первое уравнение системы (11.7) для него преобразуется в выражение (11.6).

Часто для анализа бинарных и псевдобинарных смесей используется дифференциальный метод измерения (см. гл. 1). При этом анализатор, являющийся в данном случае дифференциальным,

содержит два идентичных канала, в один из которых подается анализируемое вещество, а в другой — вспомогательное, имеющее постоянное физико-химическое свойство. Первый из каналов называют измерительным, второй — сравнительным.

На выходе анализатора, реализующего дифференциальный метод измерений, формируется сигнал, равный разности сигналов, возникающих в измерительном $U_{и}$ и сравнительном $U_{ср}$ каналах:

$$\Delta U = U_{и} - U_{ср} \quad (11.13)$$

Указанные сигналы описываются выражениями:

$$U_{и} = k_{и}' P_{см} \quad (11.14)$$

$$U_{ср} = k_{и}'' P_{в} \quad (11.15)$$

где $k_{и}'$ и $k_{и}''$ — коэффициенты преобразования измерительного и сравнительного сигналов анализатора по физико-химическому свойству; $P_{в}$ — физико-химическое свойство вспомогательного вещества.

Если коэффициенты преобразования $k_{и}'$ и $k_{и}''$ одинаковы и равны $k_{в}$, то из (11.13) — (11.15) находим

$$\Delta U = k_{и}(P_{см} - P_{в}). \quad (11.16)$$

Для бинарной или псевдобинарной смеси, физико-химическое свойство которой аддитивно,

$$P_{см} = P_{о}c_{о} + P_{н}c_{н} \quad (11.17)$$

Из выражений (11.16) и (11.17) для сигнала дифференциального анализатора находим

$$\Delta U = Kc_{о} + U_{0}. \quad (11.18)$$

где $U_{0} = k_{и}(P_{н} - P_{в})$ — начальный уровень сигнала дифференциального анализатора.

Если анализ осуществляется при условии, когда в качестве вспомогательного вещества используется неопределяемый компонент, выражение (11.18) преобразуется к виду

$$\Delta U = k_{и}(P_{о} - P_{в}) = Kc_{о}. \quad (11.19)$$

Для анализа состава бинарных и псевдобинарных смесей жидкостей и газов в соответствии с приведенными теоретическими представлениями могут быть использованы и используются практически все описанные в гл. 10 анализаторы физико-химических свойств. Кроме того, специально для измерения концентраций определяемого компонента в бинарных, псевдобинарных и многокомпонентных смесях разработано большое число принципов измерений. Описание наиболее важных из них приведено далее. В § 11.2—11.10 рассматриваются анализаторы, основанные на физическом, а в § 11.11—11.16 — на физико-химическом методах анализа. Анализа-

торы, основанные на химическом методе анализа (см. табл. 9.1) в настоящее время практически не используются для автоматического контроля в химико-технологических процессах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности.

§ 11.2. Термокондуктометрические газоанализаторы

Принцип действия термокондуктометрических (от лат. *conductor* — проводник) газоанализаторов основан на процессе теплопереноса в газах под действием градиента температур. Термокондуктометрические анализаторы по принципу действия относятся к тепловым средствам измерений (см. гл. 9). Теплопроводность определяет собой количество тепловой энергии, проходящей через единицу площади, за единицу времени при градиенте температуры, равном единице температуры на единицу длины. Размерность теплопроводности в СИ Дж/(град·с·м) или Вт/(град·м).

Передача тепловой энергии теплопроводностью происходит при столкновении между собой молекул, имеющих различную кинетическую энергию. Теплопроводность газов пропорциональна произведению длины свободного пробега молекул на их число в единице объема. Она практически не изменяется при больших изменениях давления, пока длина свободного пробега молекул не становится соизмеримой с размерами емкости, в которой расположен газ. Для подавляющего большинства газов теплопроводность заметно возрастает с увеличением температуры. Для многих газов и паров жидкостей величина, обратная теплопроводности,

$$\frac{1}{\lambda} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_i} c_i, \quad (11.20)$$

— тепловое сопротивление — с высокой точностью является аддитивной, где $1/\lambda$ — тепловое сопротивление анализируемой газовой смеси; $1/\lambda_i$ — тепловое сопротивление i -го компонента смеси; c_i — объемная концентрация i -го компонента.

Измерение теплового сопротивления анализируемой газовой смеси осуществляется в термокондуктометрических газоанализаторах по электрическому сопротивлению терморезистора в процессе передачи тепловой энергии от этого терморезистора, нагреваемого электрическим током до некоторой температуры, через слой анализируемого газа постоянной толщины к стенкам камеры, в которой этот терморезистор размещен, имеющим меньшую, чем терморезистор, постоянную температуру.

Основной частью термокондуктометрического газоанализатора является детектор, представляющий собой металлический блок 1 (рис. 11.1, а), в котором высверлены две или чаще четыре камеры 2, 6, 7, 8 цилиндрической формы. В каждой из камер в проволочных держателях 4, укрепленных в электроизоляционной обойме 5, размещены металлические или полупроводниковые терморезисто-

ры 3. Металлические терморезисторы выполнены из платиновой, вольфрамовой или вольфрамрениевой проволоки диаметром 0,02—0,05 мм. Иногда проволока защищена от коррозии стеклянной оболочкой. Сопротивление металлических терморезисторов составляет обычно 5—60 Ом. Полупроводниковые терморезисторы выполнены в виде бусинок диаметром 0,2—0,5 мм с сопротивлением 2—30 кОм.

Схема термокондуктометрического газоанализатора показана на рис. 11.1, б. Анализируемый и вспомогательный газы поступают из блока подготовки газов 9 с постоянными объемными расходами соответственно в соединенные последовательно камеры 2, 6 и 8, 7 (рис. 11.1, а). Размещенные в этих камерах измерительные $R_{и}$ и сравнительные $R_{ср}$ терморезисторы включены в неравновесный мост, для питания которого служит стабилизированный источник питания 11 (обычно постоянного тока). Напряжение питания подбирают таким, чтобы терморезисторы были нагреты до температуры 50—200°C. Резистор R_0 служит для настройки начального уровня сигнала неравновесного моста, резистор R_d — для настройки коэффициента передачи.

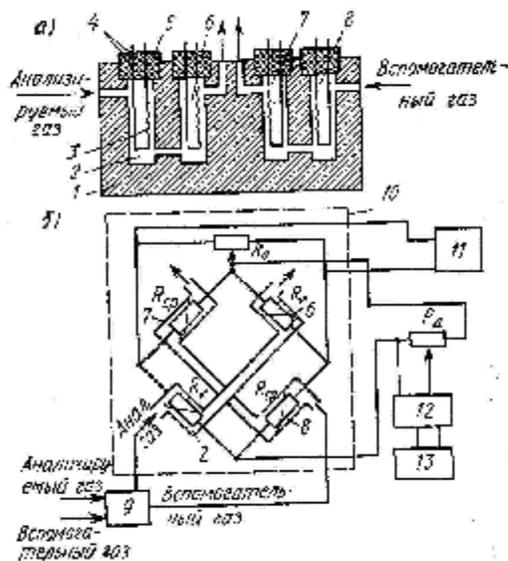


Рис. 11.1. Схемы термокондуктометрического детектора (а) и газоанализатора (б)

Тепловая энергия, выделяющаяся на терморезисторах $R_{и}$, отводится в общем случае за счет теплопроводности через слой газа, конвекции, излучения и теплопроводности в тонких креплениях терморезистора. Режим работы терморезисторов подбирают так, чтобы теплопередача в камерах детектора происходила практически полностью за счет теплопроводности через слой газа.

Когда теплопроводности анализируемого и сравнительного газов одинаковы, с помощью резистора R_0 на измерительной диагонали моста устанавливается нулевое значение сигнала. При изменении теплопроводности смеси условие теплопередачи в камерах 2 и 6 изменяется, а в камерах 7 и 8 остается прежним. Это вызывает изменение сопротивлений терморезисторов $R_{и}$. В результате на

измерительной диагонали моста возникает разбаланс, часть которого с резистора R_d поступает в промежуточный преобразователь 12, вырабатывающий унифицированный сигнал. Этот сигнал воспринимается автоматическим потенциометром 13. Разбаланс моста описывается выражением [22]:

$$\Delta U = K_\lambda (1/\lambda_{cm} - 1/\lambda_b), \quad (11.21)$$

где K_λ — коэффициент преобразования термокондуктометрического газоанализатора; $1/\lambda_{cm}$, $1/\lambda_b$ — тепловое сопротивление анализируемой смеси и слоя вспомогательного газа соответственно.

Это выражение по структуре аналогично выражению (11.16), что определяет справедливость для термокондуктометрических анализаторов всех ранее приведенных выводов (см. § 11.1).

В термокондуктометрических анализаторах аналитическое устройство 10 обычно термостатируется либо применяются дополнительные устройства, осуществляющие коррекцию показаний анализатора в зависимости от его температуры [19]. Иногда камеры 7 и 8 выполняются герметичными и заполняются газом с теплопроводностью, соответствующей нижнему пределу измерений газоанализатора.

Термокондуктометрические газоанализаторы применяются для измерения концентрации H_2 , He, CO_2 , SO_2 , NH_3 , Ag, Cl_2 в бинарных и псевдобинарных газовых смесях. Они также очень широко используются в качестве детекторов в газовых хроматографах (см. гл. 12).

Технические характеристики термокондуктометрических газоанализаторов: диапазон измерений от 0—1 до 0—100%, чувствительность 5—20 мВ/% об.; классы точности 2,5—10 (увеличивается с уменьшением диапазона измерений); время реакции 60—120 с.

§ 11.3. Диффузионные газоанализаторы

Принцип действия диффузионных газоанализаторов основан на процессе переноса вещества (компонента смеси) под действием градиента его концентрации. Этот перенос может происходить при соприкосновении веществ друг с другом (диффузия) или сквозь твердое вещество (трансфузия или проницание). Процесс переноса вещества связан с хаотическим тепловым движением молекул, происходящим в направлении уменьшения концентрации вещества и ведущим к его равномерному распределению по занимаемому объему. Проникновение через твердое тело определяется наличием разрывов в их кристаллической решетке, нерегулярных щелей и пор в макроструктуре твердого вещества или растворением газов и паров в твердом веществе. Наиболее быстро процесс переноса вещества под действием градиента концентрации происходит в газах, что во многом определяет использование этого явления для автоматического контроля концентрации газов.

Интенсивность взаимного проникновения двух соприкасающихся газов определяется коэффициентом их взаимной диффузии, который зависит от молекулярных масс этих газов и полярности их молекул. Коэффициент взаимной диффузии увеличивается с увеличением температуры и уменьшается с увеличением давления.

При диффузии газа через мембрану из твердого пористого вещества при условии сравнимости длины свободного пробега молекул с диаметром пор (процесс так называемой кнудсеновской диффузии) коэффициент диффузии обратно пропорционален квадратному корню из молекулярной массы газа.

Коэффициенты диффузии через непористые материалы (кварц, стекло, металлы, полимеры), используемые в качестве мембран, индивидуальны для различных газов и зависят от механизма проникания.

Во многих важных для аналитического контроля случаях можно считать, что каждый компонент анализируемой газовой смеси проникает через мембрану независимо от других компонентов.

При взаимной диффузии двух газовых объемов независимая диффузия компонентов многокомпонентной смеси наблюдается только при ее предварительном 3—4-кратном разбавлении.

На рис. 11.2, а показана схема диффузионного мембранного анализатора

концентрации водорода. В этом анализаторе камеры 2 и 1 разделены тонкой (10—20 мкм) мембраной из сплава палладия с серебром.

Аналитическое устройство анализатора термостатируется при температуре 45°C. Через камеру 2 с постоянным объемным расходом прокачивается анализируемый газ, содержащий водород, а через камеру 1 — вспомогательный газ (например, воздух или азот), который предварительно проходит через камеру 4.

В камере 1 размещены измерительный $R_{и}$, а в камере 4 — сравнительный $R_{ср}$ терморезисторы. Эти терморезисторы подключены к неравновесному мосту 5 и образуют термокондуктометрический детектор (см. § 11.2). При работе анализатора через мембрану из камеры 2 в камеру 1 диффундирует только водород, который добавляется к вспомогательному газу и изменяет теплопроводность газового потока, омывающего измерительный терморезистор $R_{и}$. Это вызывает изменение сигнала неравновесного моста 5, который измеряется и регистрируется самопишущим потенциометром 6.

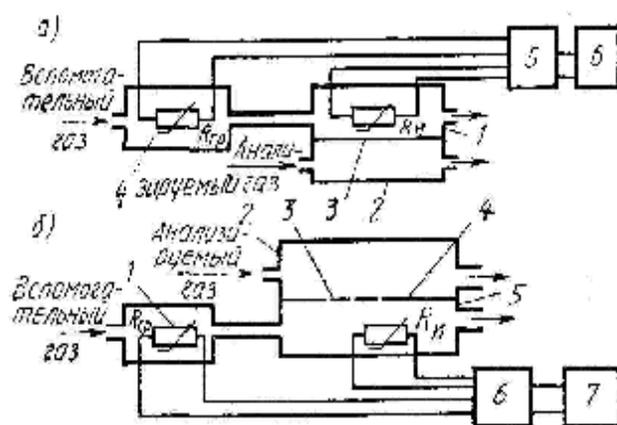


Рис. 11.2. Схемы диффузионных газоанализаторов

Когда поток газа, проникающего через мембрану, мал (2-, 3% об. от расхода вспомогательного газа), сигнал анализатора описывается выражением

$$U = k\lambda = \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \frac{D_M S}{\delta Q_B} c_0 = K_D c_0, \quad (11.22)$$

где D_M — коэффициент диффузии определяемого компонента через мембрану; S и δ — площадь и толщина мембраны; λ — теплопроводность газа, проникающего через мембрану;

$$K_D = k\lambda = \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right) \frac{D_M S}{\delta Q_B} \text{ — коэффициент преобразования анализатора.}$$

Из выражения (11.22) следует, что сигнал анализатора однозначно определяется концентрацией водорода в анализируемой многокомпонентной газовой смеси. Анализатор обеспечивает селективное измерение концентраций водорода, дейтерия и гелия в диапазонах от 0—1 до 0—100% об., имеет класс точности 3 и время реакции 10—15 с. Кроме палладиевых мембран в рассмотренном анализаторе для решения задач селективного измерения концентрации других газов и паров могут быть использованы тонкие (5—20 мкм) пленки из различных полимерных материалов.

На рис. 11.2, б приведена схема автоматического диффузионного анализатора концентрации легкого компонента в многокомпонентных смесях, основанного на взаимной диффузии. Здесь через камеру 2 с постоянным объемным расходом прокачивается анализируемый газ, а через камеры 1 и 5 — вспомогательный газ, например воздух. Камеры 2 и 5 отделены друг от друга непроницаемой перегородкой 4, в которой имеется окно 3, закрытое металлической сеткой или бумагой. В камере 1 размещены сравнительный $R_{ср}$, а в камере 5 — измерительный $R_{и}$ терморезисторы термокондуктометрического детектора.

При протекании по каналам названных газовых потоков через окно 3 между ними происходит диффузия. Причем условия ее протекания (скорость потока, размеры окна 3, расстояние терморезистора $R_{и}$ от окна) подобраны так, что к измерительному терморезистору успевают продиффундировать только компонент, обладающий наибольшим в данной анализируемой смеси коэффициентом диффузии (обычно это наиболее легкий компонент). Остальные компоненты сносятся потоком вспомогательного газа и практически не достигают терморезистора $R_{и}$. Поэтому изменения сопротивления терморезистора $R_{и}$, связанные с изменением теплопроводности омывающей газовой смеси, будут происходить только за счет изменения концентрации легкого компонента. Возникающий при этих изменениях разбаланс неравновесного моста 6 измеряется и записывается потенциометром 7. Аналитическое устройство анализатора термостатируется при температуре 45°C. Технические характеристики анализатора: диапазон измерений от 0—10 до

0—100% об.; класс точности 2; время реакции 10—15 с. Анализатор предназначен для измерения концентрации водорода, гелия, дейтерия, метана в многокомпонентных смесях.

Диффузионные газоанализаторы обладают на порядок большей селективностью при измерении концентрации определяемого компонента, чем термокондуктометрические, за счет существенно меньшего влияния на их показания изменений концентраций неопределяемых компонентов многокомпонентных газовых смесей.

§ 11.4. Магнитные газоанализаторы

В основу работы магнитных газоанализаторов положены различные явления, связанные с взаимодействием определяемого компонента анализируемой (в общем случае многокомпонентной) газовой смеси с магнитным полем.

Газы, которые втягиваются в магнитное поле, называют *парамагнитными*, а те газы, которые выталкиваются из магнитного поля,— *диамагнитными*. Количественно магнитные свойства газов определяются величиной, называемой *магнитной восприимчивостью*. Эта величина для парамагнитных и диамагнитных газов описывается выражениями:

$$\chi_{\text{п}} = \frac{c_{\text{к}} \mu P}{RT^2}, \quad (11.23)$$

$$\chi_{\text{д}} = \frac{X_{\text{д}} \mu P}{RT^2}, \quad (11.24)$$

где $\chi_{\text{п}}$ и $\chi_{\text{д}}$ — объемные магнитные восприимчивости парамагнитных и диамагнитных газов; $c_{\text{к}}$ — постоянная Кюри; μ — молекулярная масса; P и T — абсолютные давление и температура; R — универсальная газовая постоянная; $X_{\text{д}}$ — удельная магнитная восприимчивость диамагнитного газа.

Магнитная восприимчивость парамагнитных газов является положительной величиной, диамагнитных газов — отрицательной. Она обладает свойством аддитивности. Подавляющее большинство газов и паров являются диамагнитными. Парамагнитными свойствами обладают кислород и оксиды азота. Причем по абсолютному значению магнитная восприимчивость кислорода в 100 раз и более превосходит магнитную восприимчивость остальных газов и паров (кроме оксидов азота). Аномальные параметрические свойства кислорода используются для получения измерительной информации о его концентрации в многокомпонентных смесях газов и паров. Измерение концентрации кислорода с помощью магнитных газоанализаторов базируется на рассмотренном методе анализа псевдобинарных смесей (см. случай 3, § 11.1).

В настоящее время разработано много конструкций магнитных газоанализаторов для измерения концентрации кислорода. Наиболее распространенными являются термомагнитные газоанализаторы.

На рис. 11.3 приведена схема термомагнитного газоанализатора. В его работе используется явление термомагнитной конвекции, сущность которого заключается в том, что при расположении в неоднородном магнитном поле проводника, нагреваемого электрическим током, за счет уменьшения магнитной восприимчивости кислорода, вызванного нагреванием [см. (11.23)], образуется движение газовой смеси, направленной от области большей напряженности магнитного поля к области меньшей напряженности.

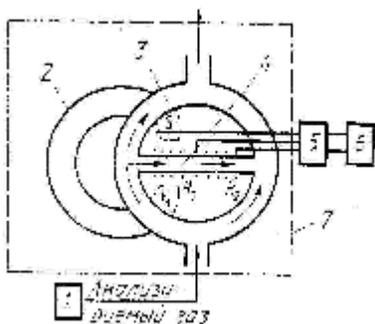


Рис. 11.3. Схема термомагнитного газоанализатора

Анализируемый газ поступает из блока подготовки 1 с постоянным объемным расходом в кольцевую камеру 3. По диаметру этой камеры установлена тонкостенная стеклянная трубка 4 с намотанными на ней терморезисторами теплового расходомера R_1 и R_2 (см. гл. 7). Если в анализируемом газе отсутствует кислород, то при горизонтальном положении трубки 4 поток газа через нее отсутствует.

Когда в анализируемом газе имеется кислород, он втягивается в магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом 2 около левого (на рисунке) конца трубки 4. Затем кислород нагревается терморезистором R_1 до температуры выше точки Кюри ($\sim 80^\circ\text{C}$), при которой он теряет свои парамагнитные свойства, становится диамагнитным и выталкивается из магнитного поля (в направлении стрелки на рис. 11.3). Возникает «магнитный ветер» — поток газа, протекающий по трубке 4. Расход газа в трубке 4 измеряется тепловым расходомером. Разбаланс неравновесного моста 5, определяемый объемной концентрацией кислорода в анализируемом газе, измеряется и регистрируется потенциометром 6. Аналитическое устройство 7 анализатора термостатируется при температуре 45°C . Диапазоны измерений термомагнитного газоанализатора от 0—1 до 0—100% об.; классы точности 2,5—5 (в зависимости от диапазона измерений), время реакции 120 с.

§ 11.5. Сорбционные газоанализаторы

В основу работы сорбционных газоанализаторов положены различные эффекты, сопровождающие процесс сорбции (сорбция — поглощение твердым телом или жидкостью вещества из окружающей среды). Это явление давно используется в аналитическом контроле. Так, широко распространены волосяные влагомеры воздуха, в которых сигнал измерительной информации формируется за счет изменения длины волоса с изменением влажности воздуха. Интенсивное развитие сорбционных методов и средств автомати-

ческого контроля наблюдается в последнее время. В сорбционных газоанализаторах используются механические, тепловой, оптические и электрические эффекты, сопровождающие процесс адсорбции газов и паров. В дилатометрическом газоанализаторе (рис. 11.4, а), предназначенном для измерения концентрации водорода, в камере 2, через которую прокачивается анализируемый газ, размещена тонкостенная трубка 1, изготовленная из палладия. Водород, содержащийся в анализируемом газе, растворяется в палладии. При этом длина трубки 1 за счет эффекта набухания с увеличением концентрации водорода увеличивается. Так как верхний конец трубки 1 закреплен на корпусе 2, то ее нижний конец свободно перемещается. С помощью емкостного, индуктивного или пневматического преобразователя перемещений 4 измеряются перемещения пластины 3, укрепленной на нижнем конце трубки 1. Эти перемещения связаны с концентрацией водорода в многокомпонентных газовых смесях.

Известны сорбционные дилатометрические газоанализаторы, предназначенные для измерения концентрации пропана, бутана, диоксида углерода или других технических газов, в которых вместо палладиевой трубки используется стержень, изготовленный из адсорбен-

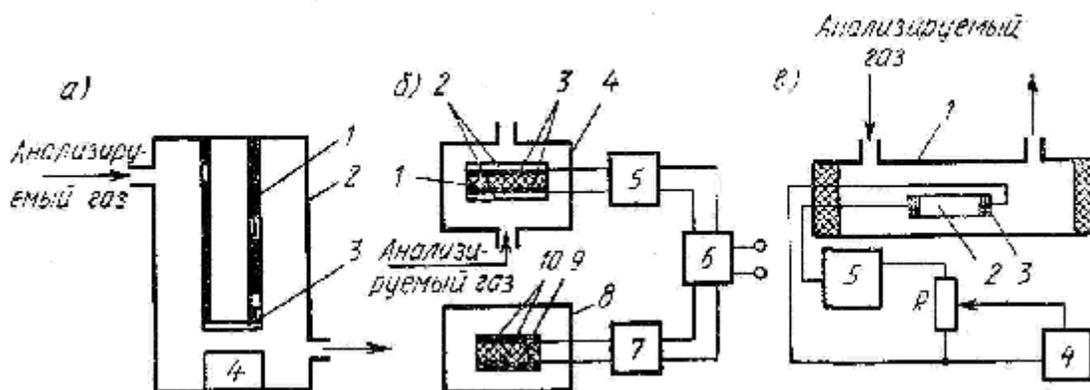


Рис. 11.4. Схемы сорбционных газоанализаторов

та (активированный уголь, алюмогель, силикагель).

На рис. 11.4, б показана схема газоанализатора, основанного на определении массы сорбированного определяемого компонента анализируемой смеси. Последнее осуществляется путем измерения частоты или амплитуды колебаний пьезоэлектрической (обычно кварцевой) пластины 1 (размерами $12 \times 12 \times 0,2$ мм), на поверхности которой напылены электроды 3 и нанесен слой сорбента 2. Пластина включена в колебательный контур высокочастотного (5—15 МГц) генератора 5 и размещена в камере 4, через которую прокачивается анализируемый газ. При изменении концентрации определяемого компонента, который селективно сорбируется слоем сорбента 2, изменяется масса последнего, что изменяет частоту

колебаний пластины, а следовательно, и частоту колебаний генератора 5. Выходной сигнал этого генератора поступает в смеситель 6, а сигнал опорной частоты поступает в смеситель от генератора 7, частота колебаний которого определяется пьезокварцевой пластиной 9 с электродами 10, размещенной в герметичной камере 8. Частота биения, возникающего на выходе смесителя, определяется из выражения

$$\Delta f = \frac{f^2}{N\rho S} m, \quad (1.25)$$

где f — собственная частота колебаний пластины с сорбирующим слоем; N — частотный коэффициент, зависящий от типа среза кристалла кварца и формы пластины; ρ и S — плотность и площадь поверхностного слоя пластины; m — масса сорбированного вещества.

Рассмотренный газоанализатор может использоваться для измерения концентрации H_2 , NO_2 , SO_2 , NH_3 , H_2S и паров HCl , Hg , H_2O , ароматических углеводородов и других веществ при соответствующем подборе сорбирующего слоя. В качестве сорбирующего слоя обычно используются различные жидкие фазы, применяемые в газожидкостной хроматографии (см. гл. 12). При использовании газоанализатора для измерения концентрации паров воды, т. е. в качестве гигрометра (от греч. *hygros* — влажный и *metréo* — измеряю), сорбирующий слой выполняют из диоксида кремния, пентоксида фосфора, сульфированного полистирола и других гигроскопических полимеров и природных смол.

Рассмотренный газоанализатор в качестве гигрометра в настоящее время наиболее распространен. Влагомеры такого типа имеют широкий диапазон измерений от $0-10^{-5}$ до $0-3\%$ об. и время реакции $10-30$ с.

Интенсивно развивающимся направлением автоматического газового анализа являются методы и средства, базирующиеся на использовании электрических явлений, сопровождающих процесс сорбции. В основу работы сорбционных электрокондуктометрических (далее просто кондуктометрических) газоанализаторов положено измерение проводимости адсорбентов, изготовленных в виде гранул, пластин или пленок. Проводимость существенно изменяется при сорбции газов или паров. Как правило, материалы, из которых изготавливают указанные элементы, являются полупроводниками.

В настоящее время разработано большое число конструкций сорбционно-кондуктометрических газоанализаторов. Из всего многообразия этих конструкций можно выделить газоанализаторы с пленочным, диодным, триодным чувствительным элементом и чувствительным элементом в виде гранулы. В качестве материалов в полупроводниковых пленочных чувствительных элементах используют в основном оксиды металлов SnO_2 , Nb_2O_5 , CoO , ZnO , ZrO_2 , TiO_2 , а также германий и кремний. На рис. 11.4, в показана схема

газоанализатора с пленочным чувствительным элементом. В качестве пленки 2 используется оксид цинка, нанесенный на боросиликатную подложку. Толщина пленки 20—1000 Å, размеры ее 20×4 мм. Через нанесенные на нее контакты 3 пленка подложки подключается к измерительной схеме. При протекании через камеру 1 анализируемого газа определяемый компонент сорбируется на пленке и изменяет ее электрическое сопротивление.

Вещества, обладающие донорными свойствами, увеличивают электропроводность, а вещества с акцепторными свойствами уменьшают ее. Сигнал анализатора определяется током, создаваемым в цепи стабилизированным источником 5, который преобразуется в унифицированный сигнал высокоомным преобразователем 4. Для получения высокой чувствительности пленку нагревают до температуры 200—400°С.

Явления сорбции применяются в сочетании с другими явлениями в ряде других средств аналитического автоматического контроля (см. § 11.7, 12.2, 12.3).

§ 11.6. Испарительные и конденсационные анализаторы

По принципу действия (см. табл. 9.1) испарительные и конденсационные газоанализаторы относятся к тепловым средствам измерений, так как в их работе используются тепловые эффекты испарения, кипения и конденсации жидкости.

Одним из старейших и распространенных газоанализаторов является психрометрический, или психрометр (от греч. *psyohria* — холод и *metréo* — мерю). Действие его основано на измерении изменений температуры жидкости при ее испарении в анализируемый газ, содержащий в качестве определяемого компонента пары этой жидкости. Психрометры могут использоваться для измерения концентрации паров любых жидкостей в газах, однако наиболее широко они применяются для измерения концентрации паров воды, т. е. в качестве гигрометров.

Концентрацию паров жидкости в газах принято характеризовать абсолютной или относительной влажностью.

Абсолютная влажность определяется как масса паров жидкости в единице объема сухого или влажного газа в нормальных условиях.

Относительная влажность, или степень насыщения газа парами жидкости, определяется как отношение массы паров в единице объема к максимально возможной массе паров в единице объема при той же температуре, выраженное в %:

$$\varphi = (A/A_n)100, \quad (11.26)$$

где A — значение абсолютной влажности газа при данной температуре; A_n — максимально возможное значение абсолютной влажности при данной температуре, соответствующее насыщению.

на практике относительную влажность с достаточной точностью определяют из выражения

$$\varphi = (P / P_n)100, \quad (11.27)$$

где P — парциальное давление паров жидкости в газовой смеси при данной температуре и нормальном давлении; P_n — давление насыщенных паров жидкости при тех же условиях.

В настоящее время известно большое число конструкций психрометрических анализаторов.

Схема одного из распространенных психрометров показана на рис. 11.5, а. Этот газоанализатор предназначен для измерения

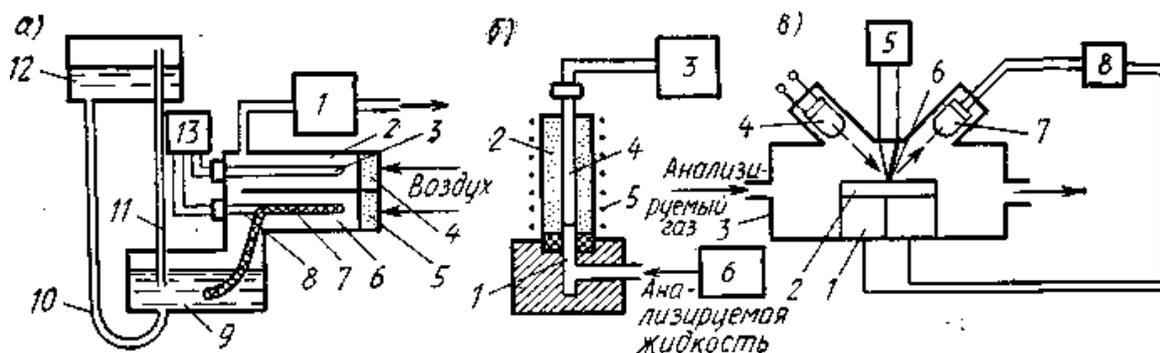


Рис. 11.5. Схемы испарительных и конденсационных анализаторов

относительной влажности воздуха. Воздух с помощью вентилятора 1 со скоростью 3—4 м/с прокачивается через фильтры 4 и 5 камер 2 и 6, в которых размещены платиновые терморезисторы 3 и 8. Терморезистор 3 служит для измерения температуры воздуха, его называют *сухим термометром*. Термометр 8 обернут в хлопчатобумажную ткань 7 (фитиль), конец которой погружен в ванночку 9, заполненную дистиллированной водой. Этот терморезистор называют *мокрым термометром*. При испарении воды с поверхности фитиля в потоке воздуха температура терморезистора 8 уменьшается, причем тем больше, чем меньше его влажность. Сопротивления терморезисторов 3 и 8 измеряются специальным вторичным прибором 13.

Для поддержания в ванночке некоторого уровня воды служит бачок 12 с трубками 10 и 11. По мере испарения воды с фитиля ее уровень в ванночке 9 понижается, открывается нижний конец трубки 11, через него в бачок поступает воздух и из бачка в ванночку 9 стекает вода. Когда вода перекрывает нижнее отверстие трубки 11, в газовом пространстве бачка постепенно (по мере истечения из него воды) образуется разрежение. Вода из бачка вытекает до тех пор, пока это разрежение станет достаточным для уравнивания гидростатического давления, определяемого разностью уровней воды в бачке и ванночке. Определение относительной влажности по температурам сухого t_c и мокрого t_m термомет-

ров в рассматриваемом психрометре базируется на приближенной зависимости [24]:

$$\varphi = f\left(\frac{t_M - a}{t_c - b}\right). \quad (1.28)$$

Вычисление относительной влажности по приведенному выражению осуществляется вычислительным устройством, представляющим собой двойной мост; которым снабжен вторичный прибор 13.

Диапазон измерений психрометра 20—100% относительной влажности, классы точности 4—6; время реакции 3—5 мин.

На рис. 11.5, б показана схема анализатора состава бинарных или псевдобинарных жидкостей, сигнал которого однозначно определяется ее удельной объемной теплотой испарения. Поток анализируемой жидкости подается с постоянным объемным расходом из блока подготовки б во внутреннюю полость 1 пористого цилиндра 2, в котором размещен платиновый терморезистор 4. Под действием капиллярных сил анализируемая жидкость проникает к нагревателю 5. За счет тепловой энергии нагревателя жидкость испаряется, что вызывает понижение температуры пористого цилиндра, которая преобразуется в унифицированный электрический сигнал с помощью терморезистора 4 и нормирующего преобразователя 3. Анализатор может осуществлять измерения суммарной объемной концентрации углеводородов алканового ряда в многокомпонентных смесях жидких углеводородов, так как удельные объемные теплоты испарения углеводородов ароматического и циклоалканового рядов практически одинаковы и составляют $3 \cdot 10^6$ кДж/м³, а для алканов $2 \cdot 10^6$ кДж/м².

Схема конденсационного газоанализатора приведена на рис. 11.5, в. В настоящее время такие газоанализаторы используются в основном в качестве гигрометров. В основу их работы положено измерение температуры, при которой анализируемый газ достигает при неизменном давлении состояния насыщения. Из него выпадает конденсат (роса) жидкости, концентрация паров которой в газе измеряется. Эту температуру принято называть *температурой точки росы (или инея)*, а анализаторы, основанные на измерении этой температуры,— гигрометрами точки росы. Анализируемый газ с постоянным объемным расходом прокачивается через камеру 3, в которой размещен полупроводниковый термоэлемент (термопара) 1, служащий холодильником. К холодному спаю этой термопары припаяно металлическое зеркальце 2. К горячему спаю термопары подается напряжение постоянного тока от автоматического регулятора 8. При протекании через полупроводниковую термопару постоянного тока ее холодный спай, а с ним и зеркальце 2 охлаждаются. Охлаждение происходит до тех пор, пока на поверхности зеркальца не образуется конденсат (иней). При этом световой поток, поступающий от лампы 4 к фотоприемнику 7, уменьшается за счет рассеяния на поверхности зеркальца, покрытой инеем.

Это вызывает уменьшение входного сигнала регулятора и отключение или уменьшение (в зависимости от принятого закона регулирования) напряжения питания термопары 1. За счет теплоты, вносимой в камеру 3 потоком анализируемого газа, зеркальце и холодный спай постепенно нагреваются. При этом конденсат с поверхности зеркальца испаряется и световой поток, поступающий к фотоприемнику, восстанавливается до начального значения. Регулятор 8 подключает или увеличивает напряжение питания термопары и холодный спай ее начинает опять охлаждаться. Таким образом, температура зеркальца автоматически поддерживается равной температуре точки росы. Эта температура преобразуется в унифицированный сигнал с помощью термоэлектрического чувствительного элемента 6 и нормирующего преобразователя 5. Гигрометры точки росы обычно имеют диапазон измерений от -80 до $+40^{\circ}\text{C}$ при давлении анализируемого газа $0,05$ — 10 МПа. Абсолютная погрешность измерения $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Известны конструкции конденсационных газоанализаторов, обеспечивающие измерение температуры точки росы по воде, углеводородам и температуры начала гидратообразования.

§ 11.7. Диэлькометрические анализаторы

Принцип действия диэлькометрических анализаторов состоит в измерении диэлектрической проницаемости ϵ среды, заполняющей электрический конденсатор, емкость которого определяется выражением

$$C = k\epsilon, \quad (11.29)$$

где k — постоянный коэффициент, который определяется размерами конденсатора и его конструкцией.

Эти анализаторы применяются для анализа состава бинарных или псевдобинарных смесей газов и жидкостей. На рис. 11.6, *a* показана схема диэлькометрического гигрометра, в котором измерение диэлектрической проницаемости используется совместно с явлением сорбции паров воды из анализируемого газа. В этом гигрометре анализируемый газ прокачивается с постоянным объемным расходом через камеру 1, в которой размещен алюминиевый стержень 2, по поверхности которого сделана нарезка и нанесен оксид алюминия. В нарезку уложена никелевая проволока 3. Стержень 2 и проволока 3 образуют конденсатор, емкость которого увеличивается при сорбции паров воды оксидом алюминия. Последняя вызывает увеличение емкости конденсатора, которая измеряется неравновесным электрическим мостом переменного тока и вторичным прибором (вольтметром) 4. Существуют схемы диэлькометрических гигрометров с равновесным электрическим мостом.

Обычно гигрометры рассмотренного типа обеспечивают измерение относительной влажности в пределах 20 — 100% . Известны диэлькометрические гигрометры, в которых поры оксидной пленки

заполнены насыщенным раствором гигроскопической соли. Они обеспечивают измерение микроконцентраций влаги в газах, начиная с $1 \cdot 10^{-4}$ % об.

Диэлькометрические анализаторы находят широкое применение для автоматического контроля концентрации воды в нефтях. Нефть, содержащая воду, по диэлектрической проницаемости может рассматриваться как псевдобинарная смесь (см. § 11.1) ввиду того,

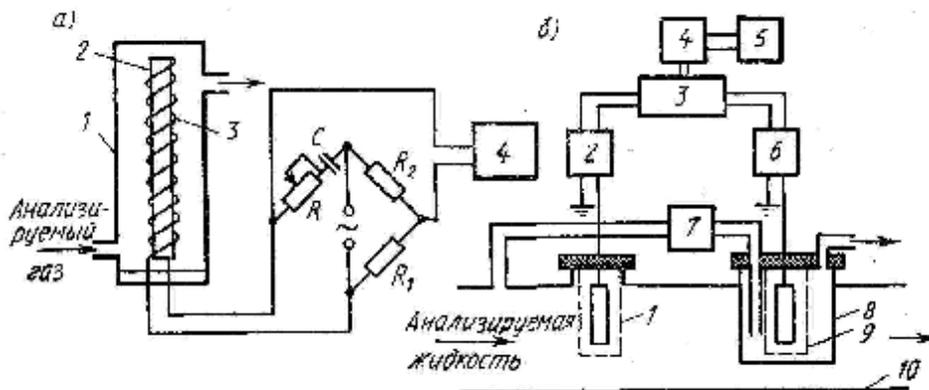


Рис. 11.6. Схемы диэлькометрических анализаторов

что диэлектрическая проницаемость воды составляет 81, а для углеводородов, входящих в состав нефтей, 2—2,6. Схема диэлькометрического дифференциального влагомера нефти показана на рис. 11.6, б. Анализатор содержит два цилиндрических конденсатора 1 и 9. Конденсатор 1 установлен в трубопроводе 10, по которому протекает анализируемая нефть, а конденсатор 9 установлен в емкости 8, которая периодически заполняется нефтью, очищенной в устройстве 7 от воды и механических примесей. Конденсаторы 1 и 9 включены в колебательные контуры генераторов 2 и 6. Частоты колебаний последних пропорциональны емкостям конденсаторов 1 и 9. Входные сигналы генераторов поступают в смеситель 3. Выходной сигнал смесителя определяется разностью частот колебаний генераторов, которая в соответствии с выражениями (11.18) и (11.29) определяется концентрацией воды в нефти. Сигнал смесителя в преобразователе 4 преобразуется в унифицированный сигнал постоянного тока, который измеряется и регистрируется автоматическим потенциометром 5. Необходимость использования дифференциальной схемы связана с тем, что при малых концентрациях воды дополнительная погрешность, вызванная различием в значениях диэлектрических проницаемостей нефтей из различных месторождений, становится существенной. Диэлектрические влагомеры нефти имеют классы точности 4—6 и обеспечивают измерение концентрации воды в диапазоне от 0—3 до 0—60 % об.

§ 11.8. Оптические анализаторы, в работе которых используется излучение видимой части спектра

Для измерения концентраций в настоящее время используется излучение практически всего спектра электромагнитных колебаний, начиная с радиоволн и кончая γ -излучениями. Наиболее широкое применение имеют излучения инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областей спектра. Анализаторы, работающие с излучениями этих областей спектра, называют *фотометрическими* (от греч. *photos* — свет и *metréo* — измеряю). В анализаторах используются явления поглощения, отражения и рассеяния электромагнитного излучения анализируемым веществом. Поглощение (абсорбция) электромагнитного излучения количественно описывается законом Бугера — Ламберта — Бера:

$$I_{\lambda} = I_{0\lambda} e^{-k\delta} = I_{0\lambda} e^{-\varepsilon_{\lambda}\delta} \quad (11.30)$$

где $I_{0\lambda}$ и I_{λ} — интенсивность монохроматического излучения с длиной волны λ , входящего в слой анализируемого вещества и выходящего из него (под интенсивностью излучения понимают полный поток энергии излучения, проходящий за единицу времени через единицу площади и направленный нормально к ней); k — показатель поглощения излучения веществом на длине волны λ ; δ — толщина слоя вещества; c — концентрация поглощающего компонента; ε_{λ} — коэффициент, зависящий от длины волны излучения. Выражение (11.30) обычно представляют в виде:

$$\ln(I_{0\lambda}/I_{\lambda}) = \varepsilon_{\lambda}\delta c = D_{\lambda}, \quad (11.31)$$

$$\ln(I_{\lambda}/I_{0\lambda}) = -\varepsilon_{\lambda}\delta c = T_{\lambda}. \quad (11.32)$$

Величины D_{λ} и T_{λ} в приведенных выражениях называют соответственно *оптической плотностью или экстинкцией (ослаблением)* и *прозрачностью (пропусканием)* слоя вещества толщиной δ на длине волны λ . Из выражений (11.31) и (11.32) следует, что если значение $I_{0\lambda}$ поддерживать постоянным, то при постоянных ε_{λ} и δ интенсивность I_{λ} однозначно определяется концентрацией c поглощающего компонента в анализируемой смеси. Если анализируемое вещество содержит несколько (например, n) компонентов, поглощающих излучение с длиной волны λ , то суммарная оптическая плотность определяется выражением

$$D_{\lambda\Sigma} = \delta \sum_{i=1}^n \varepsilon_{\lambda i} c_i, \quad (11.33)$$

где $\varepsilon_{\lambda i}$ и c_i — постоянный коэффициент и концентрация i -го компонента.

Анализаторы, основанные на явлении поглощения электромагнитного излучения, называют *абсорбционнооптическими* и *абсорбционнометрическими*.

Поглощение излучения видимой части спектра связано с переходами между энергетическими уровнями валентных электронов атомов или молекул поглощающего вещества.

Анализаторы жидкостей и газов, основанные на явлении поглощения электромагнитного излучения видимой части спектра, называются колориметрами или *фотоколориметрами* (от лат. *color* — цвет и от греч. *metréo* — измеряю).

Излучение видимой части спектра используется также для измерения концентрации жидких или твердых частиц в газе (дым, туман), твердых или форменных частиц в жидкостях (суспензия, эмульсия). Газы или жидкости, содержащие различные частицы, называют дисперсными средами.

При прохождении потока света через дисперсную среду имеет место его рассеяние, которое при прочих постоянных условиях зависит от соотношения размеров частиц и длины световой волны. Если последняя значительно больше размера частиц, то имеет место дифракция световой волны, т. е. огибание волной частицы. Если же размеры частицы больше длины волны, то имеет место преломление и отражение света на границе фаз.

Рассеяние света в дисперсной среде описывается выражением по формуле, совпадающей с выражением для закона Бугера — Ламберта — Бера, а именно интенсивность излучения:

$$I = I_0 e^{-k_p \delta}, \quad (1.34)$$

где k_p — показатель рассеяния излучения, зависящий от концентрации частиц, их размера и формы, а также от коэффициента преломления материала частиц и среды.

Рассеяние света дисперсной средой принято характеризовать *мутностью* последней.

Анализаторы дисперсных сред, основанные на явлении рассеяния света и измерении светового потока, проходящего через анализируемую среду, называются *турбидиметрами* (от лат. *turbineus* — вихреобразный и от греч. *metréo* — измеряю). Интенсивность I_p отраженного света в отличие от интенсивности I света, прошедшего через слой анализируемой среды, находится в линейной зависимости от концентрации частиц в этой среде:

$$I_p = a I_0 c, \quad (11.35)$$

где a — коэффициент, зависящий от длины световой волны, плотности материала частиц, их объема, показателей преломления материала частиц и среды, угла между падающим и отраженным потоками света, размеров слоя анализируемой среды.

Анализаторы дисперсных сред, основанные на явлении рассеяния света и измерении отраженного этой средой светового потока, называют *нефелометрами* (от греч. *nephele* — облако, туча и *metréo* — измеряю).

В силу того, что свет разных длин волн имеет различные коэффициенты преломления при разработке фотоколориметрических,

турбидиметрических и нефелометрических анализаторов, для обеспечения требуемой чувствительности применяют фильтры, что позволяет использовать ту часть спектра, которая в наибольшей степени изменяется при прохождении через анализируемую среду.

Схемные и конструктивные решения анализаторов, в работе которых используется излучение видимой части спектра, весьма разнообразны. Колориметрические анализаторы классифицируют в зависимости от числа источников и приемников излучения, числа используемых лучей и наличия предварительного преобразования анализируемого вещества. На рис. 11.7 приведены схемы колориметрических, турбидиметрических и нефелометрических анализаторов

Колориметрический анализатор (рис. 11.7, а) имеет один источник (лампа 1) и два приемника (фотоэлементы 6 и 9) излучения и является двухлучевым. Излучение, выходящее из источника 1,

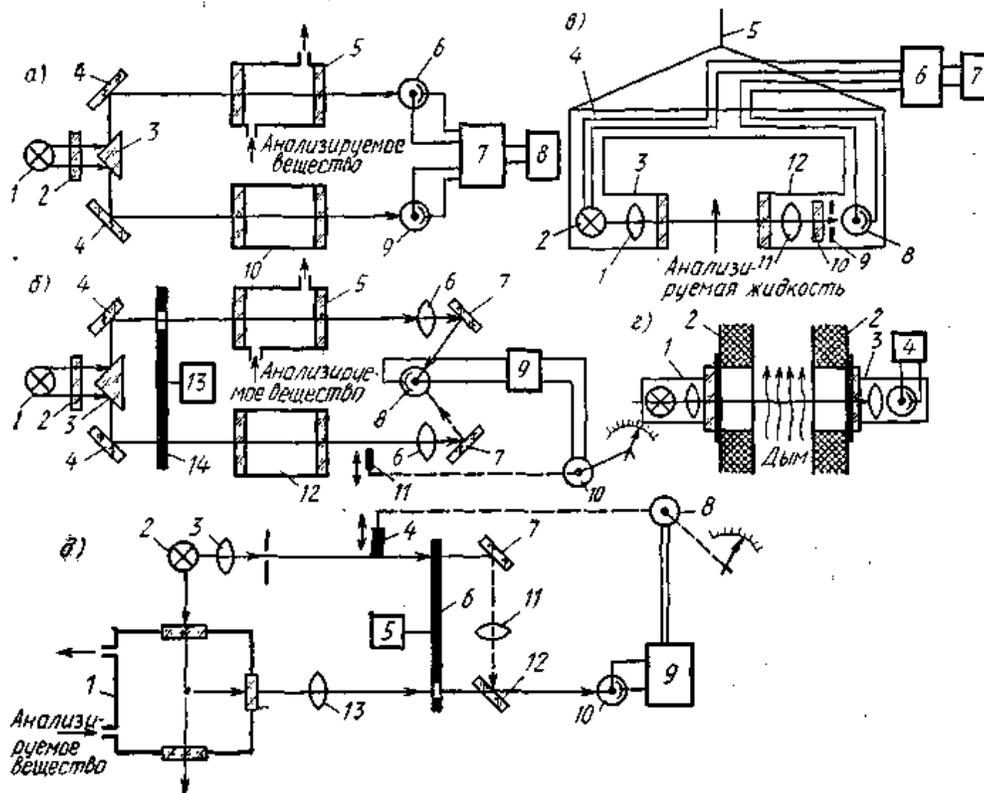


Рис. 11.7. Схемы фотометрических анализаторов видимого излучения

пройдя через фильтр 2, разделяется на два луча, которые через зеркала 4 поступают в измерительную 5 и сравнительную 10 кюветы. Через измерительную кювету прокачивается анализируемое вещество, а сравнительная обычно заполняется образцовым веще-

ством (вещество с известной или равной нулю концентрацией определяемого компонента). Фотоэлементы 6 и 9 включены на вход усилителя 7 встречно, поэтому разность их сигналов, преобразованная в этом усилителе в унифицированный сигнал, однозначно зависит от концентрации определяемого компонента в анализируемом веществе. Выходной сигнал усилителя 7 измеряется и регистрируется вторичным прибором 8.

Колориметрический анализатор (рис. 11.7, б) является двухлучевым и имеет один источник и один приемник излучения. Излучение от лампы 1, пройдя фильтры 2, с помощью призмы 3 и зеркал 4 разделяется на два луча, поступающих в измерительную 5 и сравнительную 12 кюветы. С помощью obtуратора (от лат. *obturare* — закрывать выход) 14, который представляет собой диск с отверстиями, приводимый во вращение синхронным двигателем 13, лучи, поступающие в кюветы, поочередно перекрываются. Таким образом, к фотоэлементу 8 через линзы 6 и зеркала 7 одновременно поступает излучение, вышедшее из какой-то одной кюветы. Если излучения, поступающие из измерительной и сравнительной кювет различны, то на выходе усилителя 9 формируется сигнал, который заставляет реверсивный двигатель 10 перемещать заслонку 11, перекрывающую фотопоток, выходящий из сравнительной кюветы, до тех пор, пока не восстановится равенство излучений, поступающих к фотоэлементу из кювет 5 и 12. Таким образом, колориметр реализует метод уравнивающего преобразования (см. гл. 2). Угол поворота ротора реверсивного двигателя 10 и перемещение связанной с ним стрелки по шкале однозначно зависят от концентрации определяемого компонента в анализируемом веществе.

На рис. 11.7, в приведена схема турбидиметрического погружного анализатора мутности жидкостей. В этом анализаторе источник и приемник излучения размещены в герметичных боксах 3 и 12, укрепленных на держателе 4. Источник света содержит лампу 2 и линзу 1, а приемник — линзу 11, светофильтр 10, диафрагму 9 и фотоэлемент 8. Во внутренней полости держателя 4 размещен блок 6, который служит для питания источника излучения и усиления сигнала фотоэлемента. Выходной сигнал блока 6 измеряется вторичным прибором 7. Держатель 4 прикреплен к подвеске 5, на которой анализатор подвешивается при погружении в анализируемую жидкость.

На рис. 11.7, г показана схема турбидиметрического анализатора содержания частиц сажи в дымовых газах (дымомер). Источник 1 и приемник излучения 3 размещены в этом анализаторе напротив друг друга вне трубопровода 2, с тем чтобы уменьшить загрязнение стеклянных окон источника и приемника. Сигнал приемника излучения воспринимается вторичным прибором 4. Шкала вторичного прибора обычно разделена на несколько делений, характеризующих степень загрязненности дымовых газов взвешенными частицами. При постоянных скорости движения газового потока, размерах и плотности взвешенных частиц шкала вторичного

прибора может быть проградуирована в массовых или объемных концентрациях.

Схема нефелометра, построенного по методу уравнивающего преобразования, показана на рис. 11.7, *д*. Излучение от источника 2 разделяется на два потока. Поток отраженного в кювете 1 анализируемой средой света через линзу 13 и полупрозрачное зеркало 12 поступает в фотоэлемент 10. Второй поток попадает в этот фотоэлемент через линзу 3, диафрагму, зеркала 7 и 12 и линзу 11. Названные потоки поочередно перекрываются obtюратором 6, который вращается синхронным двигателем 5. Световые потоки сравниваются между собой, и в случае их различия электронный усилитель вырабатывает сигнал, управляющий работой реверсивного двигателя 8, который перемещает заслонку 4 до тех пор, пока не восстановится равенство световых потоков, поступающих в фотоэлемент. Мерой концентрации взвешенных частиц в анализируемом веществе служит перемещение стрелки, связанной с ротором двигателя.

Информационные возможности рассмотренных анализаторов существенно расширяются, когда в их состав включено устройство предварительного воздействия на анализируемое вещество. Схемы анализаторов такого типа показаны на рис. 11.8. В качестве вспомогательного воздействия используются химические реакции и преобразование фазы анализируемого вещества.

На рис. 11.8, *а* показана схема колориметрического анализатора жидкостей циклического действия, основанного на окрашивании анализируемой жидкости после добавления к ней специально подобранного (колориметрического) реагента. Интенсивность окраски зависит от концентрации определяемого компонента. Анализатор содержит емкость 1, в которую поступает анализируемая жидкость, и емкость 4, заполненную колориметрическим реагентом. Число емкостей со вспомогательным реагентом в зависимости от решаемой задачи может достигать до пяти. Периодически по сигналам управляющего устройства 9 (связи его с остальными устройствами анализатора для упрощения рисунка не показаны) в соответствующем порядке переключаются электроуправляемые клапаны 2 и постоянные объемы анализируемой жидкости и реагента из дозаторов 3 и 5 вводятся в емкость 7, снабженную мешалкой 6. После перемешивания жидкость из емкости 7 переливается в кювету 8, где с помощью колориметра осуществляется измерение интенсивности окраски жидкости.

Анализаторы такой конструкции применяются для измерения жесткости воды, концентрации в ней кремниевой кислоты, фосфатов, гидразина, сахара, растворенных в жидкостях газов и др. Измеряемые концентрации составляют от долей до нескольких десятков миллиграммов в литре.

Для измерения микроконцентраций газов находят применение ленточные газоанализаторы (рис. 11.8, *б*). В них реакция анализируемого газа с жидким реагентом происходит на индикаторной

бумажной или текстильной ленте 5, которая с помощью роликов 4 и 7, приводимых в движение от привода, с постоянной скоростью протягивается через кювету 6. Через эту же кювету с постоянным объемным расходом прокачивается анализируемый газ. Лента заранее пропитана или периодически смачивается реагентом, который способен вступать в реакцию

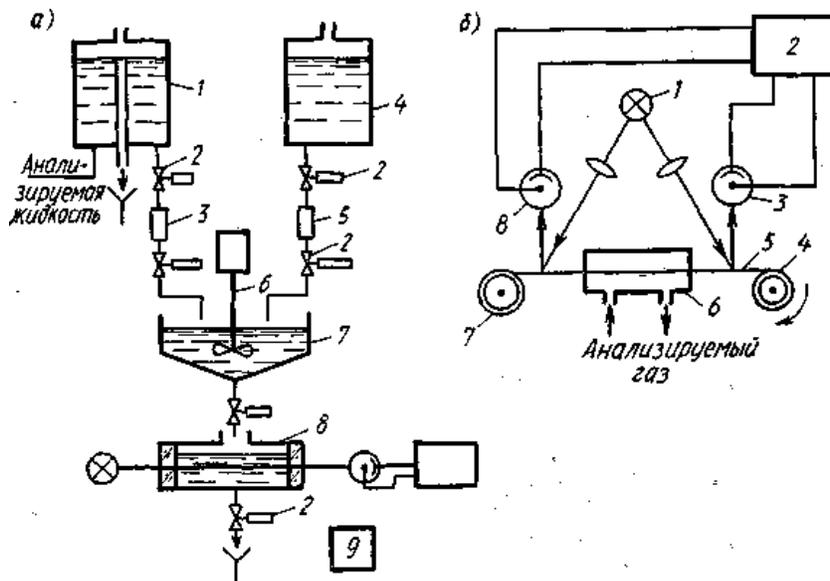


Рис. 11.8. Схемы фотометрических анализаторов видимого излучения с предварительным преобразователем анализируемого вещества

с определяемым компонентом анализируемой газовой смеси с образованием окрашенных продуктов. Излучение от источника 1 поступает к ленте двумя лучами. Последние отражаются от поверхности ленты до и после прохождения ею кюветы 6. Соответственно отраженные лучи поступают в фотоэлементы 8 и 3, включенные дифференциально на вход электронного усилителя 2. Выходной сигнал последнего определяется разностью сигналов фотоэлементов, которые однозначно зависят от интенсивности окраски индикаторной ленты, т. е. от концентрации определяемого компонента.

Известны колориметрические анализаторы, основанные на предварительном преобразовании жидкого анализируемого вещества в аэрозоль, а также анализаторы, в которых аэрозоль или иней (рис. 11.5, в) образуются в результате конденсации определяемого компонента из анализируемого газа.

Оптические анализаторы, в работе которых используется излучение видимой части спектра, в зависимости от схемы и конструкции имеют классы точности 2—20.

§ 11.9. Абсорбционные ультрафиолетовые и инфракрасные анализаторы

Большинство газообразных и жидких веществ обладает способностью поглощать ультрафиолетовое излучение (УФ-излучение), однако спектры поглощения этого излучения для многих веществ существенно перекрываются. Это определяет возможность селективного измерения по поглощению УФ-излучения концентрации весьма ограниченного числа веществ. Способностью поглощать УФ-излучение обладают ароматические и гетероциклические соединения. Углеводороды парафинового ряда практически не поглощают УФ-излучение. Абсорбционные ультрафиолетовые анализаторы на химико-технологических процессах применяются в основном для измерения концентрации газов и паров, а именно: диоксида азота, озона, ртути, сернистого ангидрида, сероводорода, сероуглерода, формальдегида, фосгена, хлора, четыреххлористого углерода и др. В последнее время абсорбционные ультрафиолетовые анализаторы с миниатюрными (в несколько микролитров) оптическими кюветами находят применение в промышленных жидкостных хроматографах (см. гл. 12).

Конструктивно абсорбционные ультрафиолетовые анализаторы, выполняемые однолучевыми и двухлучевыми, реализуют методы прямого или уравнивающего преобразований, т. е. по схемам они аналогичны анализаторам (см. § 11.7), в работе которых используется излучение видимой части спектра. Особенностью абсорбционных ультрафиолетовых анализаторов является необходимость применения в их оптических системах элементов, изготовленных из кварца. В качестве источника УФ-излучения в этих анализаторах применяются ртутные, ртутно-кадмиевые, кадмиевые, водородные и ртутные газоразрядные лампы, и в качестве лучеприемников — фотоэлементы, фотосопротивления, фотоумножители, чувствительные к УФ-излучению. Обычно используется УФ-излучение с длиной волны 0,254 мкм. Абсорбционные ультрафиолетовые анализаторы позволяют измерять концентрацию в диапазонах от $0—10^{-4}$ до $0—100\%$ об. в зависимости от типа определяемого компонента и имеют классы точности 2—10.

Способностью поглощать инфракрасное излучение (ИК-излучение) обладают вещества, молекулы которых состоят не менее чем из двух различных атомов. Это определяет возможность применения абсорбционных инфракрасных анализаторов для измерения концентраций самых разнообразных веществ. На рис. 11.9, а приведены спектры поглощения ИК-излучения для некоторых газов. На рисунке можно выделить длины волн, на которых имеет место селективное поглощение ИК-излучения, например, для CO_2 , CO , CH_4 и C_2H_6 , что определяет возможность селективного измерения их концентраций в многокомпонентных газовых смесях. Такие газы, как азот, кислород, водород, гелий, аргон и другие, не поглощают ИК-излучение.

В последнее время разработано несколько схем инфракрасных анализаторов, в работе которых используется метод прямого или уравнивающего преобразования. Как правило, эти схемы являются дифференциальными и двухлучевыми. В качестве источников излучения используются излучатели из хромоникелевой проволоки (нихром) диаметром 0,3 мм, нагретой до 700— 800°С. Приемниками излучения служат болометры (от греч. *bole*— лучи и *metréo* — мера) с батареей термоэлектрических чувствительных элементов или терморезисторов, фоторезисторы и так называемые конденсаторные микрофоны.

Инфракрасные газоанализаторы, в которых в качестве приемника излучения используется конденсаторный микрофон, называют *оптико-акустическими* по той причине, что первоначально при их разработке частота колебаний мембраны конденсатора составляла 200 Гц, т. е. располагалась в области звуковых частот. Впоследствии эти частоты были снижены до 6 Гц, однако первоначально принятое название газоанализаторов пока применяется часто.

На рис. 11.9, б показана одна из распространенных схем оптико-акустических газоанализаторов. Здесь инфракрасное излучение (2—8 мкм) от источников 1, расположенных в сферических отражателях 2 и нагреваемых током источника питания 3, направляется в измерительный канал через фильтровую кювету 6, измерительную кювету 7 и отражатель 8 к нижней камере луче-приемника 9, а в сравнительном канале — через сравнительную кювету 18 и компенсационную отражающую кювету 16 к верхней камере луче-приемника 9. Обтюратор 5, приводимый в движение синхронным двигателем 4, осуществляет поочередное прерывание потока излучения в измерительном и сравнительном каналах. Через измерительную кювету 7 непрерывно прокачивается анализируемый газ. Сравнительная кювета 18 заполняется газовой смесью, в состав ко-

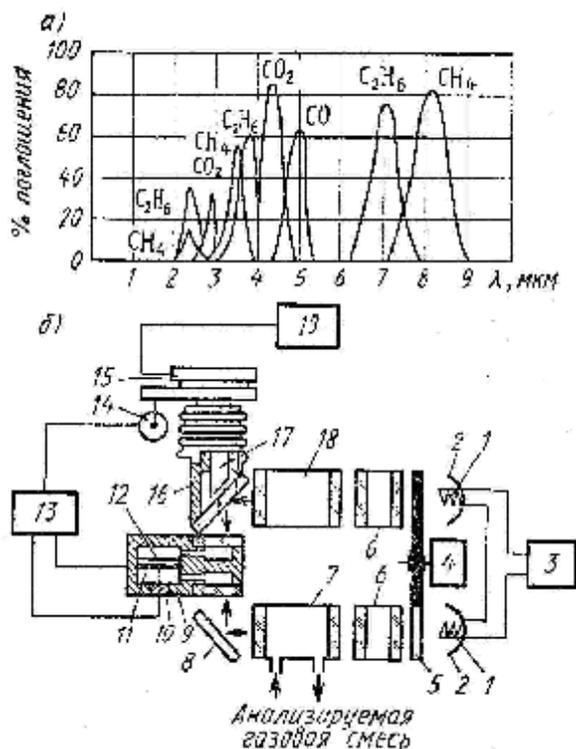


Рис. 11.9. Спектры поглощения ИК-излучения газами (а) и схема инфракрасного анализатора (б)

торой входят какой-либо не поглощающий ИК-излучение газ и неопределяемые компоненты в концентрациях, соответствующих их средним значениям в анализируемой смеси. Фильтровые кюветы *б* заполняются теми неопределяемыми компонентами анализируемого газа, полосы поглощения которых частично перекрываются полосами поглощения определяемого компонента, что уменьшает влияние изменений концентраций этих компонентов на результат измерения. Камеры лучеприемника *9* и кюветы *1б* заполняются определяемым компонентом.

При поступлении ИК-излучения в камеры лучеприемника *9* за счет энергии излучения, поглощаемой определяемым компонентом, изменяется его температура (изменение температуры обычно составляет 10^{-5}°C). Это сопровождается появлением колебаний разности давлений в камерах лучеприемника в результате поочередного прерывания потоков ИК-излучения обтюратором. Под действием этой разности давлений тонкая (толщина 5—10 мкм) металлическая мембрана *12* совершает периодические колебания. Эта мембрана и неподвижная пластина *11*, укрепленная на изоляторе *10*, составляют конденсаторный микрофон, емкость которого изменяется при колебаниях мембраны. При изменении содержания определяемого компонента в анализируемой смеси колебания мембраны *12*, а следовательно, и изменения емкости конденсаторного микрофона становятся асимметричными, что воспринимается электронным усилителем *13*, который управляет работой реверсивного двигателя *14*. Ротор этого двигателя через механическую передачу перемещает отражающий шток *17*, что изменяет толщину поглощающего слоя газа в кювете *1б* до тех пор, пока колебания мембраны не станут симметричными. Угол поворота ротора двигателя *14* с помощью реохорда *15* реостатной системы передачи передается вторичному прибору *19*. Оптико-акустические газоанализаторы используются для измерения в многокомпонентных смесях концентраций следующих газов: CO, CO₂, CH₄, C₂H₂, NH₃, C₃H₆, C₄H₈ и др. Диапазоны измерений этих анализаторов от 0—0,1 до 0—100% об. Классы точности 2,5—10 (в зависимости от диапазона измерений).

Инфракрасные газоанализаторы с термоэлектрическими и терморезисторными болометрами используются для решения некоторых специальных задач аналитического контроля. Эти анализаторы находят широкое применение для измерения концентрации воды в нефтепродуктах, нефтях и растворителях.

Диапазоны измерений от 0—0,0001 до 0—10 % об., расход анализируемой жидкости 0,6 м/ч. Классы точности 2,5—4.

§ 11.10. Ионизационные газоанализаторы

Принцип действия этих анализаторов состоит в ионизации анализируемого вещества и измерении ионного тока. В практике аналитического контроля в настоящее время находят применение в основном ионизационные газоанализаторы, различающиеся по спо-

соду ионизации анализируемого газа (ионизация радиоактивных излучений, фотоионизация, поверхностная ионизация, ионизация в тлеющем разряде и т. д.).

На рис. 11.10 приведены схемы радиоактивных (радиоизотопных) ионизационных газоанализаторов. Анализируемый газ (рис. 11.10, а) поступает в камеру 1 (называемую

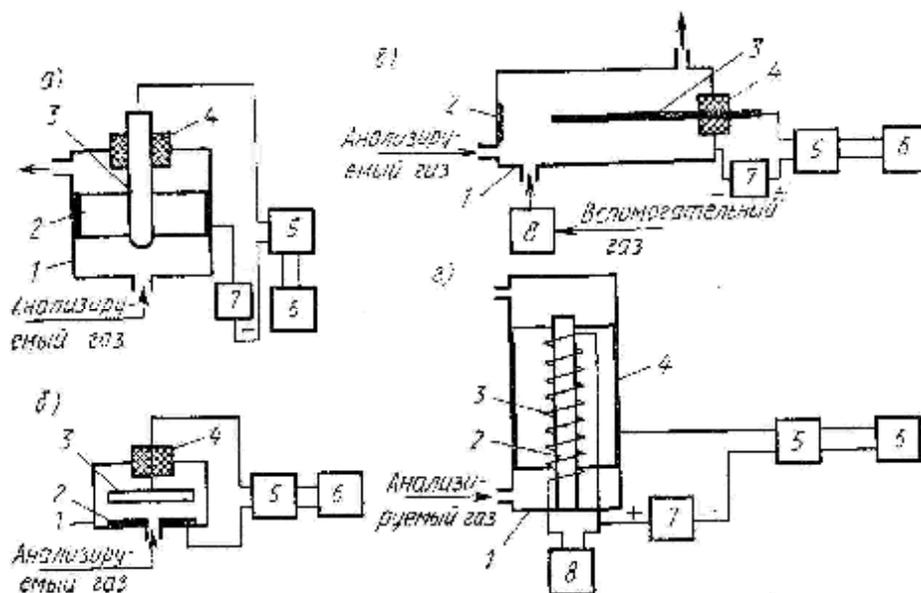


Рис. 11.10. Схемы ионизационных газоанализаторов

ионизационной) с постоянным объемным расходом. Под действием источника излучения α - или β -лучей 2 молекулы анализируемой бинарной или псевдобинарной газовой смеси ионизируются. Между источником 2 и анодом 3, укрепленным на фторопластовом изоляторе 4, под действием электрического потенциала стабилизированного источника 7 (полярность включения источника соответствует случаю ионизации β -лучами) проходит ионный ток. Значение этого тока измеряется электрометрическим преобразователем 5, выходной унифицированный сигнал которого посылается на потенциометр 6, и определяется выражением'

$$U = k_{\theta} \theta_{\text{см}}, \quad (11.36)$$

где k_{θ} — коэффициент преобразования радиоактивного ионизационного газоанализатора; $\theta_{\text{см}}$ — эффективное сечение ионизации анализируемой газовой смеси.

Эффективное сечение ионизации θ для газов является аддитивным свойством, что определяет возможность измерения concentra-

ции определяемого компонента в соответствии с выражениями (11.5) или (11.19). Обычно в ионизированных газоанализаторах используют источники β -излучения ^3H , ^{90}Sr и ^{17}Pt . Напряжение, прикладываемое между источником и коллектором 3, составляет 100—300 В.

Радиоактивные ионизационные газоанализаторы с достаточной для многих случаев чувствительностью могут работать в генераторном режиме, т. е. без внешнего источника потенциала (рис. 11.10, б), когда расстояние между плоским по конструкции источником излучения 2 и анодом 3 составляет несколько десятых долей миллиметра.

Радиоактивные ионизационные газоанализаторы обладают малой инерционностью и имеют классы точности 2—5. Они находят применение в газовой хроматографии (см. гл. 12), а также используются в составе аэрозольно-ионизационных газоанализаторов. Принцип действия этих комбинированных газоанализаторов состоит в предварительном воздействии на анализируемый газ, при котором определяемый компонент избирательно преобразуется в аэрозоль.

Число образующихся аэрозольных частиц, пропорциональное концентрации определяемого компонента, измеряется по силе тока/в ионизационной камере:

$$I = I_0 e^{-N a \tau C_m / r^2}, \quad (1.37)$$

где I_0 — начальное значение силы тока; N — постоянная Брикарда, определяемая вероятностью осаждения газовых ионов на аэрозольных частицах; a — коэффициент, зависящий от плотности и формы аэрозольных частиц; τ — время «жизни» газовых ионов в камере, определяемое ее конструкцией и напряженностью электрического поля; C_m — массовая концентрация аэрозольных частиц; r — средний радиус аэрозольных частиц.

Для преобразования определяемого компонента анализируемой газовой смеси в аэрозоль используются: химические реакции, пиролиз, каталитическая конверсия.

На рис. 11.10, в показана схема аэрозольно-ионизационного газоанализатора, в котором для преобразования определяемого компонента в аэрозоль используется химическая реакция. В этом анализаторе в отличие от анализатора на рис. 11.10, а имеется устройство 8, в котором вспомогательный газ (обычно воздух) насыщается парами реагента, служащего для образования аэрозоля. Газовый поток из устройства 8 поступает в камеру 1, где смешивается с потоком анализируемого газа. Образовавшаяся в результате химической реакции определяемого компонента и паров реагента аэрозоль изменяет ионный ток в ионизационной камере. Аэрозольно-ионизационные анализаторы обычно используются для контроля концентраций микропримесей вредных веществ, в том числе оксидов азота,

хлористого водорода, аммиака, аминов. Диапазоны измерений от 0—0,5 до 0—50 мг/м³. Классы точности 10—15.

Явление поверхностной ионизации используется в работе анализатора, схема которого показана на рис. 11.10, *з*. Анализируемый газ поступает в камеру 1 анализатора с постоянным объемным расходом. В этой камере размещены керамический пористый цилиндр 2, на который намотана платиновая нить 3, нагреваемая током источника 8 до температуры 800—1000 °С. Эта нить служит анодом. В качестве катода используется платиновый цилиндр 4. Между анодом и катодом приложено напряжение 50—500 В от источника 7. Расстояние между электродами 1—2 мм. Ионный ток между электродами определяется в основном эмиссией щелочноземельных металлов при нагревании платиновой нити. Для обеспечения стабильности работы керамический цилиндр 2 предварительно пропитывают едким кали (KOH).

Газоанализатор, основанный на поверхностной ионизации, обладает селективной чувствительностью к галогенсодержащим соединениям, увеличение концентрации которых в анализируемом газе приводит к увеличению ионного тока. Значение ионного тока преобразуется с помощью электрометрического преобразователя 5 в унифицированный электрический сигнал, поступающий на потенциометр 6. Данный газоанализатор способен измерять микроконцентрации галогенсодержащих соединений. Классы точности 10—15. Переносные газоанализаторы такого типа широко используются в качестве так называемых течеискателей при создании, эксплуатации и испытаниях холодильных аппаратов, кондиционеров и других систем, в работе которых используются фреоны различных марок.

§ 11.11. Термохимические анализаторы

Принцип действия термохимических анализаторов состоит в использовании теплового эффекта химической реакции, протекающей между определяемым компонентом анализируемой смеси и вспомогательным реагентом. Сигналом измерительной информации в термохимических анализаторах служит температура, значение которой зависит от теплового эффекта химической реакции. Термохимический принцип анализа используется для создания анализаторов газов и жидкостей. Для создания термохимических газоанализаторов используются химические реакции окисления на каталитически активной поверхности, в пламени и в газовых потоках. Для термохимических газоанализаторов жидкостей применяются реакции разбавления (разведения), нейтрализации и смешения, а также реакции с использованием специфических реагентов.

На рис. 11.11 приведены схемы термохимических газоанализаторов, в работе которых используется тепловой эффект реакции окисления горючих газов на каталитически активной поверхности.

Изменение температуры Δt при таком окислении (горении) определяется выражением

$$\Delta t = \psi Q_H c, \quad (11.38)$$

где ψ — постоянный коэффициент, зависящий от природы определяемого компонента и конструктивных параметров чувствительного элемента анализатора; Q_H — низшая удельная объемная теплота сгорания компонента; c — объемная концентрация определяемого компонента.

В термохимическом анализаторе (рис. 11.11, а) анализируемый газ воздушным эжектором (струйным насосом) 3 прокачивается через кран 10 и камеру 1. В камере размещены

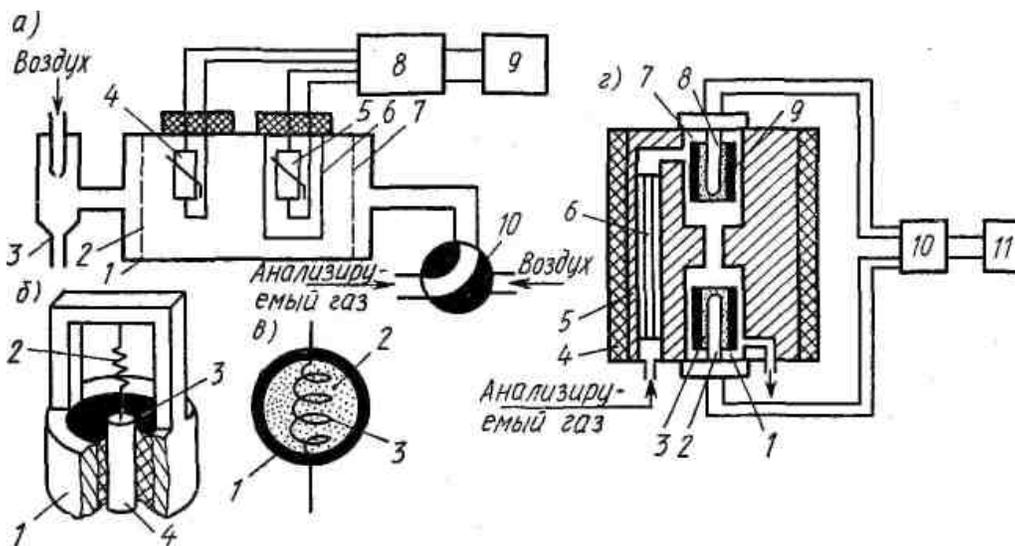


Рис. 11.11. Схемы термохимических газоанализаторов (а, з) и конструкции чувствительных элементов (б, в)

взрывопреградительные сетки 2 и 7, измерительный 4 и сравнительный 5 чувствительные элементы. Последний закрыт колпачком 6 и служит для устранения влияния изменения окружающей температуры на сигнал газоанализатора. В качестве чувствительных элементов в этих газоанализаторах используются платиновые проволочки с активированной поверхностью или так называемые пеллисторы. Конструкция чувствительного элемента с платиновой проволочкой показана на рис. 11.11, б. Проволочка 2 диаметром 0,03—0,05 мм укреплена между держателем 1 контактом 4, размещенным в изоляторе 3. Пеллистор (рис. 11.11, в) представляет собой платиновую проволочку 3 диаметром 0,03—0,05 мм, заключенную в шарик 2 или цилиндр из оксида алюминия, покрытый слоем 1 платино-палладиевого катализатора. Чувствительные элементы в термохимических газоанализаторах (рис. 11.11, а) нагреваются током неравновесного моста 8 до температуры 200—500 °С. При сгорании на поверхности

измерительного чувствительного элемента горючего определяемого компонента температура элемента увеличивается, что вызывает увеличение электрического сопротивления платиновой проволоочки, а это, в свою очередь, вызывает разбаланс электрического моста, измеряемый вторичным прибором 9 и описываемый выражением

$$\Delta U = k_1 \psi Q_n c = Kc, \quad (11.39)$$

где k_1 — постоянный коэффициент для данного неравновесного моста; $K = k_1 \psi Q_n$ — коэффициент преобразования анализатора.

Для проверки и корректировки нулевого значения сигнала газоанализатора через кран 10 в камеру 1 может быть направлен воздух, не содержащий горючих компонентов. Чувствительный элемент, представленный на рис. 11.11, в, обладает значительно большей стабильностью, чем чувствительный элемент на рис. 11.11, б, за счет большой поверхности. В то же время он имеет большую инерционность.

Газоанализатор, показанный на рис. 11.11, а, в настоящее время является одним из наиболее распространенных в промышленности средств аналитической техники по той причине, что он используется в качестве сигнализатора взрывоопасных концентраций газов и паров в воздухе. Сигнализируемые значения 5—50 % нижнего предела взрываемости (НВП) для горючих газов и паров и 5—20 % НВП — для водородовоздушных смесей, время реакции 30 с.

В термохимическом газоанализаторе (рис. 11.11, з) используется насыпной катализатор. Его температура, изменяющаяся при сгорании на нем определяемого компонента, измеряется платиновым терморезистором. Анализируемый газ с постоянным объемным расходом поступает через теплообменник 6 в сравнительную камеру 7, а затем — в измерительную камеру 1. Эти камеры выполнены в корпусе 5 из нержавеющей стали, температура которого автоматически стабилизируется на значении $(200 \pm 5)^\circ\text{C}$ с помощью электронагревателя 4 и регулятора (на рис. 11.11, з не показан). Камера 7 заполнена неактивной массой, а камера 1 — катализатором (платина, нанесенная на оксид алюминия). Терморезисторы 8 и 2, размещенные соответственно в неактивной массе и в катализаторе, включены в неравновесный мост 10, сигнал которого измеряется электронным потенциометром 11.

Термохимические газоанализаторы (рис. 11.11, з) применяются для измерения малых концентраций горючих газов (CO , H_2 , CH_4 , пары углеводородов) в воздухе или кислороде, а также для измерения малых (от 0—0,5 до 0—1 % об.) концентраций кислорода в горючих газах. Класс точности 5, время реакции 300 с.

Новым типом термохимических газоанализаторов являются озонолизные (от греч. *ozon* — пахнущий и *lysis* — разрушающий), в работе которых используется тепловой эффект селективной реакции озона с газообразными олефинами, протекающей в газовых полках. В результате этой реакции озоном разрушается двойная

связь между атомами углерода в молекуле олефина и выделяется большое количество тепловой энергии (420 кДж/моль), возникает люминесценция и образуются высококипящие продукты реакции — озониды, которые при нормальной температуре конденсируются и образуют аэрозоль.

На рис. 11.12, а показана схема анализатора концентрации олефина (этилена, пропилена или бутилена) в многокомпонентной газовой смеси. Анализатор является устройством циклического действия с импульсным вводом анализируемого вещества. Он имеет два режима работы: «Подготовка» и «Анализ».

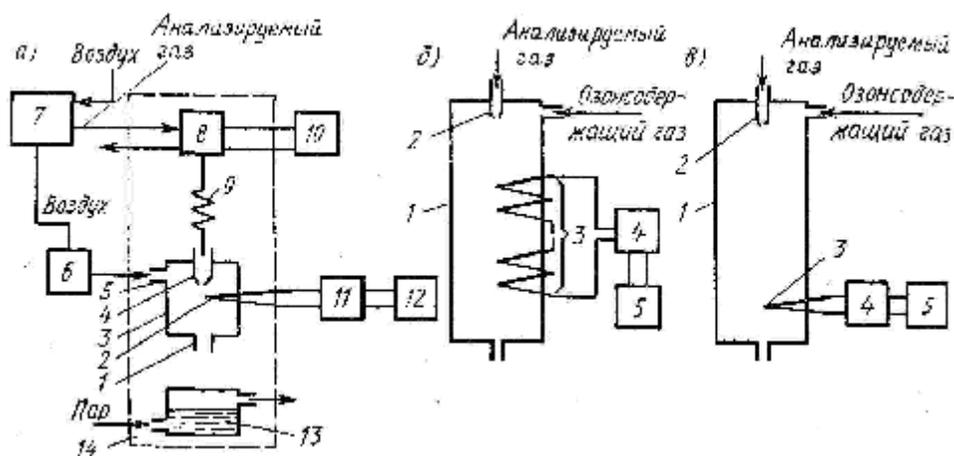


Рис. 11.12. Схемы термохимических озонолитных газоанализаторов

Управление работой анализатора осуществляется управляющим устройством 10. В режиме «Подготовка» воздух из блока подготовки газов 7 с постоянным объемным расходом прокачивается через автоматический дозатор 8 (см. гл. 12), трубу 9 и камеру 3. В эту же камеру через штуцер 5 с постоянным объемным расходом подается озонсодержащий газ, образующийся из воздуха в озонаторе 6. Газовый поток покидает камеру через штуцер 1. В режиме «Подготовка» дозируемый объем дозатора 8 промывается анализируемым газом. Этот режим длится 30 с. Затем по сигналу управляющего устройства 10 проба анализируемого газа вводится дозатором 8 в поток воздуха (газа-носителя), протекающего через него. Начинается режим работы «Анализ». Колонка 9 служит для создания небольшого (20—30 с) интервала времени между отбором пробы и ее поступлением в камеру 3. Когда проба анализируемого газа с потоком газа-носителя начинает вытекать из сопла 4, озон вступает в реакцию с олефином, содержащимся в анализируемой газовой смеси. Образующиеся продукты реакции конденсируются на поверхности батареи 2 из четырех хромель-копелевых термо-

электрических чувствительных элементов, сигнал которой преобразуется в унифицированный токовый сигнал нормирующим преобразователем 11 и имеет форму пика (см. рис. 9.3, б). Сигнал преобразователя 11 воспринимается потенциометром 12 или предварительно вычислительным устройством, определяющим и запоминающим на один цикл работы анализатора амплитуду пика (см. рис. 12.10). Названный параметр пика определяет концентрация олефина в анализируемой газовой смеси. Температура в аналитическом блоке 14 анализатора поддерживается равной $(100 \pm 1)^\circ\text{C}$ путем подачи и конденсации в емкости 13 насыщенного водяного пара при атмосферном давлении.

Использование реакции озона с олефинами позволяет измерять также суммарную концентрацию олефинов в многокомпонентных газовых смесях и концентрацию этилена в смесях, содержащих пропилен и бутилен. Анализаторы, обеспечивающие получение этой измерительной информации, отличаются от описанного выше только конструкцией первичного измерительного преобразователя. Показанный на рис. 11.12, б первичный измерительный преобразователь обеспечивает измерение суммарной концентрации олефинов. В корпусе 1 (длиной 200—250 мм) установлено сопло 2, и на оси размещены спай 20 термоэлектрических чувствительных элементов, образующих батарею 3. Сигнал батареи воспринимается нормирующим преобразователем 4. Размещение термоэлектрических чувствительных элементов по оси камеры обеспечивает получение информации о суммарном количестве тепловой энергии, которое выделяется в результате полного озонолиза всех олефинов, содержащихся в анализируемой смеси. Сигнал батареи 3 имеет форму пика (см. рис. 9.3, б), площадь которого вычисляется и запоминается на один цикл работы анализатора вычислительным устройством 5 и служит мерой суммарной концентрации олефинов в анализируемой смеси.

В основе работы анализатора концентрации этилена в многокомпонентных газовых смесях, содержащих другие олефины, лежит различие в константах скоростей реакций индивидуальных олефинов с озоном. Обычно в многокомпонентных газовых смесях помимо этилена присутствуют еще пропилен и бутилен. Константы скоростей реакций озона с бутиленом и пропиленом существенно превосходят эту величину для этилена. Это и обеспечивает возможность избирательного измерения концентрации последнего. Первичный измерительный преобразователь (рис. 11.12, в) анализатора концентрации этилена отличается от преобразователя (рис. 11.12, б) только тем, что в нем используется батарея 3 из четырех термоэлектрических чувствительных элементов, которая располагается в камере 1 на таком удалении от сопла 2 по газовому потоку, при котором реакции озона с пропиленом и бутиленом при принятой скорости движения газового потока успевают полностью завершиться, а продукты реакции охладиться до температуры газового потока. Поэтому в зоне, где размещена батарея 3, будет протекать

только реакция оставшегося этилена с озоном. Сигнал батареи 3 имеет форму пика, амплитуда которого пропорциональна концентрации этилена. Этот сигнал после нормирующего преобразователя 4 поступает в потенциометр 5 или предварительно в вычислительное устройство, определяющее и запоминающее амплитуду сигнала на один цикл работы анализатора.

Диапазоны измерений озонолизных газоанализаторов от 0—5 до 0—100 %

об.; продолжительность одного цикла 3—5 мин; классы точности 3—5 (в зависимости от диапазона измерений).

Озонолизные газоанализаторы предназначены для автоматического контроля базовых нефтехимических процессов.

Схема термохимического анализатора жидкостей показана на рис. 11.13.

В анализаторе вспомогательная и анализируемая жидкости непрерывно поступают соответственно в напорные емкости 1 и 13,

снабженные переливными трубками 2 и 12. Через капилляры 3 эти жидкости стекают в воронку 4.

В воронке 4 и реакционной камере 5 происходит смешение жидкостей и выделение тепловой энергии.

Через трубку 10 смесь, нагревшаяся в результате реакции жидкостей, стекает в измерительную камеру 6,

где ее температура измеряется термоэлектрическим чувствительным элементом 7.

Через трубку 9 жидкость выводится из анализатора. Корпус 11

анализатора покрыт термоизоляционным материалом. Сигнал термоэлектрического чувствительного элемента 7 воспринимается автоматическим

потенциометром 8 или нормирующим преобразователем.

Сигнал термоэлектрического чувствительного элемента в термохимическом анализаторе является мерой концентрации определяемого компонента в анализируемой жидкости.

Термохимические анализаторы предназначены для измерения концентраций водных растворов неорганических кислот и щелочей, солей и спиртов, концентраций ароматических углеводородов, воды в нефтях и нефтепродуктах, для измерения кислотного числа нефтепродуктов и т. п. В качестве вспомогательных жидкостей — реагентов — используются: вода, щелочи, кислоты, спирты, специальные растворители. Диапазоны измерений от 0—0,1 до 0—100%, время реакции не более 120 с, классы точности 2—5 (в зависимости от решаемой задачи и диапазона измерений).

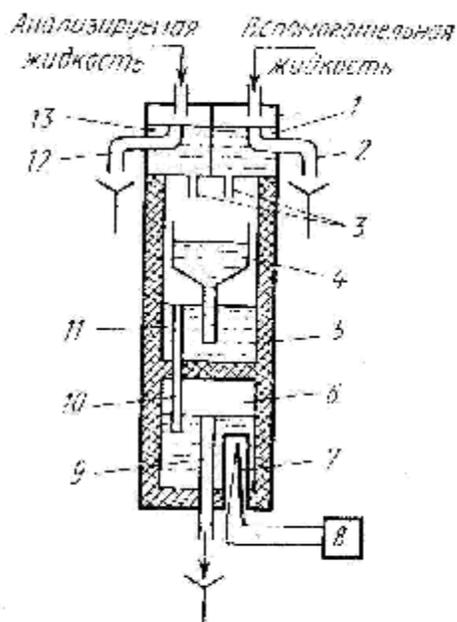


Рис. 11.13. Схема термохимического анализатора жидкостей

§ 11.12. Электрокондуктометрические анализаторы

Принцип действия *электрокондуктометрических* (или просто *кондуктометрических*) анализаторов или *кондуктометров*, которые относятся к электрохимическим средствам измерений, состоит в измерении электрической проводимости (электропроводности) растворов электролитов, по которой определяется концентрация растворенных веществ. Единицей электропроводности в СИ служит сименс (См) — величина, обратная Ому.

В растворах электролитов часть молекул диссоциирует на положительные и отрицательные ионы, которые соответственно называют катионами и анионами. Это придает растворам способность проводить электрический ток. В общем случае, если жидкость является частью электрической цепи, то она ведет себя при определенных условиях как электрическое сопротивление, проводимость k которого определяется выражением

$$k = (I/\rho)(S/l), \quad (11.40)$$

где ρ — удельное сопротивление; S и l — площадь и длина сечения проводника.

Величина, обратная удельному сопротивлению ρ , называется *удельной электрической проводимостью* (или *удельной электропроводностью*):

$$\chi = I/\rho. \quad (11.41)$$

Единицей удельной электропроводности обычно служит $1 \text{ См/см} = 10^2 \text{ См/м}$. Удельная электропроводность разбавленного однокомпонентного раствора электролита определяется законом Кольрауша:

$$\chi = \alpha c z (U_k \text{ и } U_a). \quad (11.42)$$

где α — степень электролитической диссоциации, определяющая долю диссоциировавших молекул электролита от общего их числа в растворе; c — эквивалентная концентрация раствора, выраженная в г-экв. растворенного вещества в 1 см^3 раствора; z — валентность ионов; U_k и U_a — подвижности катионов и анионов соответственно.

Вид функции, связывающей удельную электропроводность раствора с концентрацией, зависит от значения последней. Эта функция линейна (рис. 11.14, *а*) только для разбавления растворов (обычно до концентраций, не превышающих 100 мг/л), пока малы силы электростатического межйонного взаимодействия. С увеличением концентрации указанная функция становится нелинейной и даже неоднозначной (рис. 11.14, *б*).

Для разбавленных растворов удельная электропроводность растворов является величиной аддитивной. Удельная электропроводность растворов возрастает с увеличением температуры, что обусловлено увеличением количества ионов. Зависимость удельной

электропроводности χ_t от температуры t выражается уравнением второго порядка.

$$\chi = \chi_0 \left[1 + \alpha(t - t_0) + \beta(t - t_0)^2 \right], \quad (1.43)$$

где α , β , — температурные коэффициенты; χ_0 — удельная электропроводность при температуре t_0 .

Чувствительные элементы кондуктометров, по сопротивлению которых определяется концентрация анализируемого раствора, называют электролитическими измерительными ячейками. По конструкции различают контактные и бесконтактные измерительные ячейки и

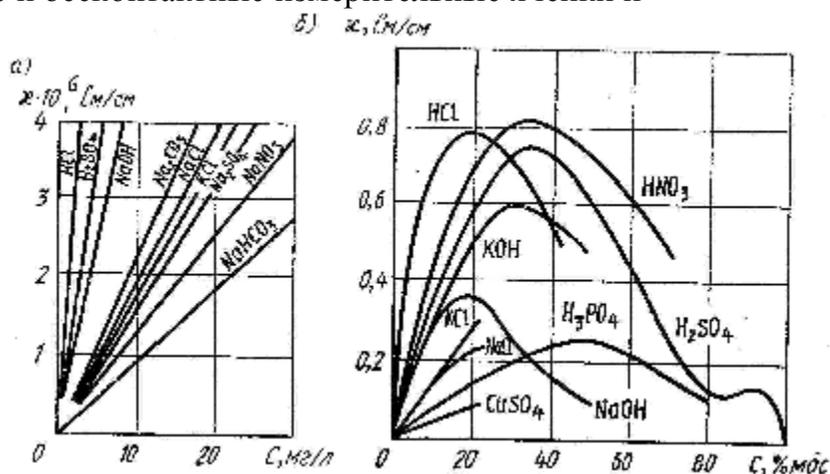


Рис. 11.14. Зависимости удельной электропроводности от концентрации

соответственно кондуктометры. В контактных измерительных ячейках в анализируемом растворе размещаются электроды, т. е. имеет место гальванический контакт с ним. В бесконтактных измерительных ячейках этот контакт отсутствует, а используется электромагнитное взаимодействие с анализируемым раствором.

По числу электродов в контактной измерительной ячейке различают двух-, трех- и четырехэлектродные ячейки.

Простейшей является двухэлектродная ячейка (рис. 11.15, а), которая представляет собой камеру 1 с двумя инертными металлическими электродами 2 и 3, заполняемую или промываемую анализируемой жидкостью. При приложении к электродам постоянной разности потенциалов на границе металл — электрод — электролит образуется так называемый двойной электрический слой, в пределах которого и протекают электрохимические процессы в ячейке. Этот слой рассматривают как плоский конденсатор, обкладками которого являются заряженные поверхности металлического электрода и слой ионов противоположного знака, находящихся вблизи поверхности электрода. По мере прохождения тока в одном направлении положительные и отрицательные ионы, соприкасаясь с элект-

родами, разряжаются и выделяются на них в виде атомов. При этом ток через раствор постоянно уменьшается, что можно рассматривать как процесс зарядки конденсаторов, образованных двойными электрическими слоями около электродов. Это явление называют поляризацией электродов. Им объясняется тот факт, что зависимость тока от напряжения, приложенного к электродам измерительной ячейки, является нелинейной (рис. 11.15, б)

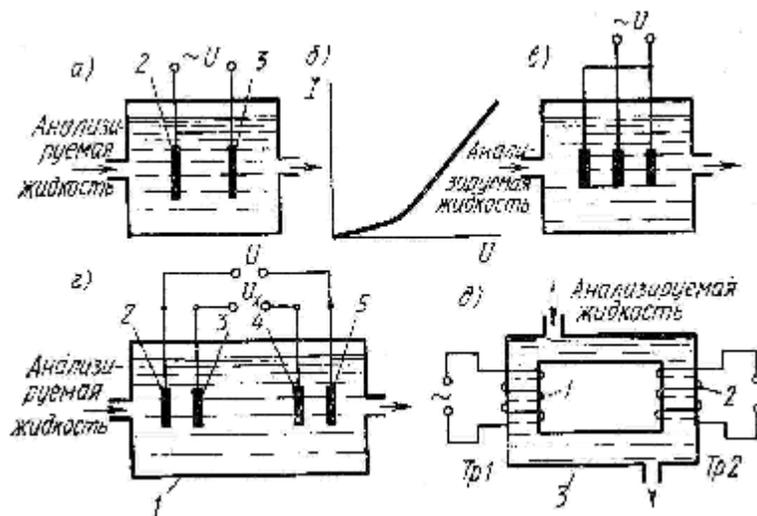


Рис. 11.15. Схемы электролитических измерительных ячеек кондуктометрических анализаторов

При прохождении через измерительную ячейку переменного тока явление поляризации электродов примерно на два порядка меньше искажает результат измерения электропроводности. Поэтому практически все измерения электропроводности растворов осуществляются на переменном токе. Причем для уменьшения погрешности от поляризации частоту переменного тока увеличивают.

Электрическое сопротивление измерительной ячейки определяется выражением

$$R = 1/(\chi K), \quad (11.44)$$

где K — константа измерительной ячейки, зависящая от площади поверхности электродов, расстояния между ними и их конфигурации, определяемая опытным путем.

Для уменьшения влияния внешних электромагнитных наводок на результат измерения применяют трехэлектродные ячейки (рис. 11.15, в), в которых средний электрод размещен между двумя внешними. Последние соединены друг с другом и обычно заземлены. Такие измерительные ячейки по существу представляют собой две двухэлектродные ячейки, включенные параллельно.

Для уменьшения погрешности, связанной с поляризацией электродов, применяют четырехэлектродные измерительные ячейки (рис. 11.15, г), в которых функции подвода электрической энергии к ячейке и съема сигнала измерительной информации разделены. В четырехэлектродной ячейке 1 к токовым электродам 2 и 5 подводится стабилизированное напряжение U от источника переменного или постоянного тока и между ними в анализируемой жидкости проходит ток. Electroды 3 и 4 служат зондами для измерения падения напряжения U_{γ} , которое создается током на участке между этими электродами. При измерении указанного падения напряжения компенсационным методом ток в цепи электродов 3 и 4 практически не проходит, и они не поляризуются.

Бесконтактные измерительные ячейки применяются при анализе жидких сред, содержащих взвеси, коллоиды, пленкообразующие и кристаллизующиеся компоненты. Различают измерительные ячейки для бесконтактной низкочастотной (промышленная и звуковая частота до 1000 Гц) и высокочастотной кондуктометрии (частоты 10^5 — 10^8 Гц).

На рис. 11.15, д показана схема бесконтактной низкочастотной ячейки. Анализируемая жидкость поступает в трубку 3 из диэлектрика, на которую снаружи намотаны обмотки двух трансформаторов — возбуждающего $Tr1$ и измерительного $Tr2$. Обмотка 1 трансформатора $Tr1$ подключена к источнику переменного тока. Раствор анализируемого вещества в трубке 3 образует замкнутый жидкостной виток и является вторичной обмоткой трансформатора $Tr1$. Под действием ЭДС, наводимой первичной обмоткой 1 в замкнутом витке, в нем проходит ток. Сила этого тока пропорциональна электропроводности анализируемой жидкости. Для измерительного трансформатора $Tr2$ жидкостный виток служит первичной обмоткой. ЭДС, наводимая в его вторичной обмотке 2, зависит от силы тока, проходящего по жидкостному витку, т. е. определяется электропроводностью анализируемой жидкости.

В практике автоматического аналитического контроля наиболее широкое применение имеют кондуктометры с контактными измерительными ячейками. Для измерения сопротивления электролитических измерительных ячеек применяются разные по схемам уравновешенные и неуравновешенные мосты переменного тока (см. гл. 6). На рис. 11.16, а приведена схема простейшего контактного кондуктометра. Измерительная ячейка 1 с измеряемым сопротивлением R_{γ} , в которую из блока подготовки поступает анализируемая жидкость, является одним из плечей уравновешенного моста. Смежное плечо моста составлено из сопротивления R и переменной емкости C , служащей для компенсации реактивной (емкостной) составляющей измерительной ячейки. Электронный усилитель 2 и реверсивный двигатель 3 служат для уравновешивания моста путем изменения сопротивлений плеч при перемещении движка реохорда R_p . Такой кондуктометр может использоваться только при постоянной температуре анализируемой жидкости. В тех случаях,

когда температура анализируемой жидкости изменяется, использует схемы, показанные на рис. 11.16, б, в. В схеме рис. 11.16, б для компенсации влияния температуры используется сравнительная электролитическая ячейка 4 с сопротивлением $R_{сп}$, которая размещается в камере 1, и поэтому температура ее всегда равна температуре анализируемой жидкости. Сравнительная ячейка заполняется жидкостью, закономерность изменения электропроводности которой близка аналогичной закономерности для анализируемой жидкости (обычно при средней концентрации определяемого компонента в последней). Как видно из рис. 11.21, б, измерительная и сравнительная ячейки включены дифференциально, что и обеспечивает температурную компенсацию с достаточной для практики точностью.

Наибольшее распространение получили кондуктометры, в которых для температурной компенсации используются металлические терморезисторы (рис. 11.16, в). Терморезистор R_t в чехле 3 размещается в анализируемой жидкости, которая поступает в камеру 1

В силу того, что температурные коэффициенты электролитов и проводников противоположны по знаку, это позволяет при соответствующем подборе значения сопротивления R_t и сопротивления шунта $R_{ш}$ добиться постоянства общего сопротивления, включенного в измерительное плечо неуравновешенного моста, при изменениях температуры в заданном интервале для некоторого, например среднего, значения концентрации определяемого компонента в анализируемой жидкости. В приведенной схеме

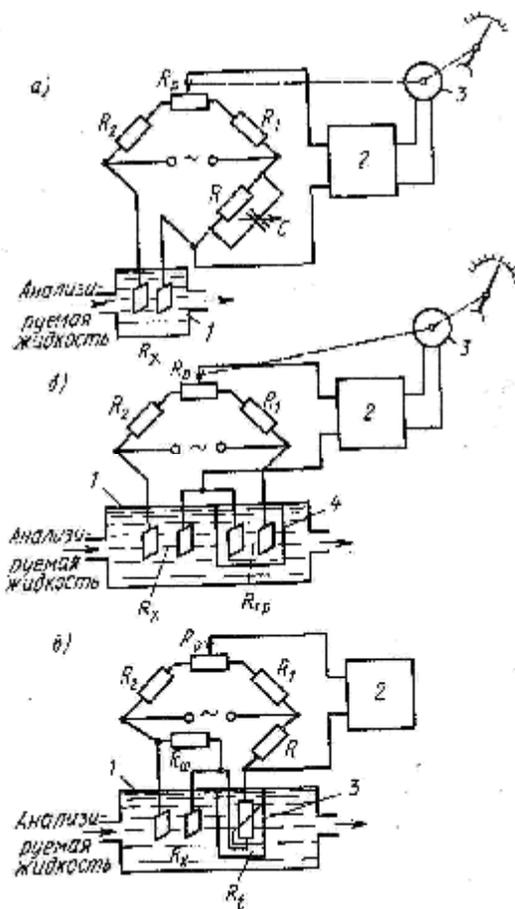


Рис. 11.16. Схема автоматических кондуктометров

разбаланс моста измеряется вольтметром 2, а резистор R_0 служит для установки начального уровня сигнала.

Кондуктометрические анализаторы используются для автоматического контроля концентрации растворов солей, кислот, щелочей и других сред. В зависимости от схемы и конструкции класс точности промышленных кондуктометров составляет 1—5. Диапазон измерений по электропроводности от $1 \cdot 10^{-8}$ до 1 См/см.

Кондуктометры могут быть использованы для анализа газовых смесей. Такой анализ базируется на предварительном растворении анализируемого газа во вспомогательной жидкости и измерении ее электрической проводимости.

Кондуктометрия находит применение в автоматическом контроле содержания солей в нефти до ее поступления на электрообессоливающие установки, широко применяемые в нефтепереработке, и на выходе из них. Анализ основывается как на измерении электропроводности, так и на предварительном воздействии на анализируемое вещество. Последнее реализуется путем тщательной промывки пробы нефти водяным конденсатом и получения так называемой водной вытяжки либо на растворении в смеси полярных и неполярных растворителей.

На рис. 11.17 приведена схема автоматического анализатора содержания солей в нефти, измерение концентрации солей в котором реализуется путем измерения электропроводности водной вытяжки. Нефть из блока подготовки поступает в дозировочный насос 1, а водяной кон-

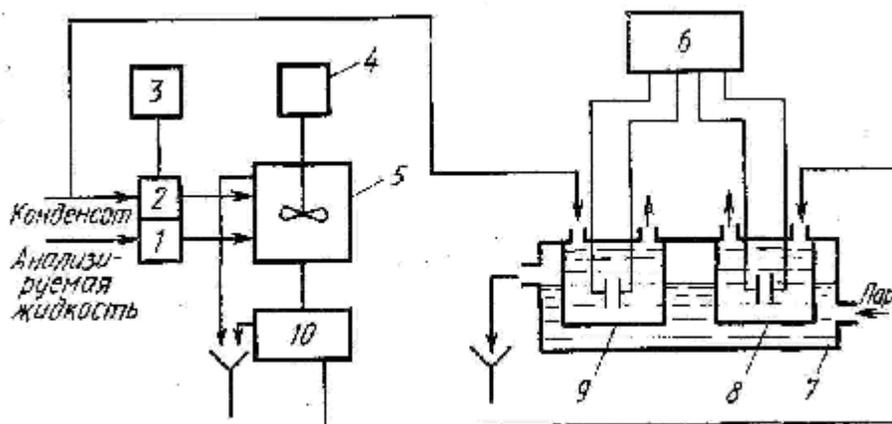


Рис. 11.17. Схема анализатора содержания солей в нефти

денсат в дозировочный насос 2. Плунжеры обоих насосов приводятся в движение общим мембранным приводом 3. Дозируемые объемы этих насосов подобраны так, чтобы в смеситель 5 с пневмотурбинкой 4 нефть и конденсат поступали в соотношении 1 : 20. После интенсивного перемешивания при температуре 90 °С, за счет которого происходит отмывка нефти от соли, образовавшаяся эмульсия сливается в многосекционный отстой-

йник 10, где происходит ее расслаивание. Нефть удаляется из отстойника сверху, а водяная вытяжка снизу. Последняя направляется в измерительную камеру 8 кондуктометра. В сравнительную камеру 9 этого дифференциального кондуктометра поступает водяной конденсат. Обе камеры располагаются в термостате 7, и их температура автоматически стабилизируется за счет подачи в эту камеру насыщенного водяного пара. Измерительная и сравнительная ячейки подключены к уравновешенному автоматическому мосту 6 (по схеме рис. 11.16, б). Продолжительность одного цикла измерения 20 мин. Диапазон измерений 0—200 мг/л. Абсолютная погрешность измерения ± 10 мг/л.

§ 11.13. Потенциометрические анализаторы

Принцип действия *потенциометрических анализаторов*, относящихся к электрохимическим средствам измерений, основан на измерении потенциала электрода, размещенного в электролите, по которому определяется концентрация определяемого компонента анализируемого вещества.

В настоящее время потенциометрические анализаторы используются для измерения концентраций различных ионов в жидкостях (*ионометрия*), для контроля окислительно-восстановительного (редокс) потенциала (*редоксметрия*), а также в газовом анализе.

В силу того, что электродный потенциал непосредственно измерить нельзя, его измеряют косвенным путем по ЭДС гальванического элемента (рис. 11.18), составленного из измерительного (индикаторного) электрода 1 и сравнительного (вспомогательного или опорного) электрода 2. Оба электрода погружены в исследуемый электролит, например анализируемую жидкость, протекающую через ячейку 3. Потенциал измерительного электрода $E_{и}$ изменяется при изменении концентрации ионов в анализируемой среде, а потенциал сравнительного электрода $E_{ср}$ остается постоянным, так как он не зависит от концентрации ионов в анализируемой среде. ЭДС такого гальванического элемента E определяется разностью потенциалов измерительного и сравнительного электродов:

$$E = E_{и} - E_{ср} \quad (11.45)$$

Измерение этой ЭДС при постоянном потенциале $E_{ср}$ позволяет получить информацию о концентрации определяемых ионов в ана-

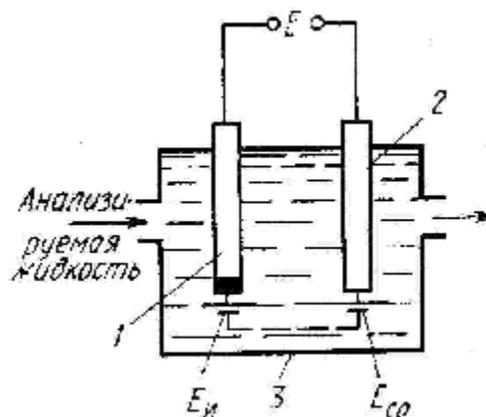


Рис. 11.18. Схема гальванического элемента (ячейки) потенциометрических анализаторов

лизируемой жидкости или о ее окислительно-восстановительных свойствах.

Для получения однозначной связи между ЭДС гальванического элемента и концентрацией определяемого иона измерительный электрод должен обладать селективностью к этому иону и не реагировать на изменение концентраций других ионов, содержащихся в анализируемой жидкости. На практике это требование трудно реализуемо, а потенциометрические анализаторы успешно применяются в основном в автоматическом контроле бинарных и псевдобинарных жидкостей.

В потенциометрии при создании гальванических элементов и электродов используются следующие потенциалы: электродный, возникающий при погружении металлических электродов в раствор их ионов; мембранный, возникающий на мембранах, обладающих селективной проницаемостью для одного типа ионов (полупроницаемые мембраны) и разделяющих два одинаковых раствора, содержащих эти ионы в различных концентрациях; окислительно-восстановительный (редокс-потенциал), устанавливающийся на инертных металлических электродах, помещенных в раствор окислительно-восстановительных веществ; диффузионный, возникающий в месте контакта двух растворов одного и того же вещества, обладающих разной концентрацией, или между двумя растворами разных веществ.

Потенциал металлического электрода, погруженного в раствор, содержащий ионы того же металла, из которого изготовлен электрод, описывается уравнением Нернста, полученным для разбавленных растворов в предположении, что поведение ионов в них подчиняется законам для идеальных газов:

$$E_{\text{ср}} = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln c_{\text{Me}^{++}}, \quad (1.46)$$

где E_0 — нормальный (стандартный) потенциал электрода, имеющий место при погружении его в раствор собственных ионов с концентрацией, равной 1 (1 грамм-ион в 1 л); R — универсальная газовая постоянная; T — абсолютная температура; n — валентность металла; F — постоянная Фарадея; $c_{\text{Me}^{++}}$ — концентрация ионов металла в растворе (в грамм-ионах в 1 л).

В общем случае вместо понятия концентрации при определении электродного и других потенциалов используют понятие активной (эффективной) концентрации (активности) $\alpha_{\text{Me}^{++}}$, которая отражает тот факт, что с увеличением концентрации ионов в растворе за счет их взаимного влияния в образовании электродного потенциала принимает участие лишь часть из них. Тогда уравнение (1.46) запишем так:

$$E_{\text{ср}} = E_0 + \frac{RT}{nF} \ln \alpha_{\text{Me}^{++}}. \quad (1.47)$$

Между активностью $\alpha_{Me^{++}}$ и концентрацией $c_{Me^{++}}$ существует зависимость:

$$\alpha_{Me^{++}} = f_a c_{Me^{++}}, \quad (1.48)$$

где f_a — коэффициент активности.

Разность потенциалов, возникающая на полупроницаемой мембране, разделяющей два раствора, описывается выражением

$$E_M = \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_1}{a_2}, \quad (1.49)$$

где a_1 и a_2 — активная концентрация или концентрация (для разбавленных растворов) ионов, для которых мембрана обладает селективной проницаемостью, в первом и втором растворах.

Появление указанной разности потенциалов связано с тем, что при наличии разности активных концентраций растворов ионы, селективно проникающие через мембрану, перемещаются через последнюю в направлении раствора с меньшей активной концентрацией до тех пор, пока постепенно возрастающая при этом разность потенциалов на мембране не достигнет значения, достаточного для прекращения перемещения этих ионов.

Окислительно-восстановительный потенциал, являющийся мерой окислительной или восстановительной способности раствора, возникает на электродах, металл которых не принимает участия в электродных процессах, а лишь обменивается электронами с компонентами окислительно-восстановительной реакции, протекающей в растворе. При этом электрод принимает потенциал, соответствующий равновесию этой реакции, описываемый выражением

$$E'_3 = E'_0 + \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_{Ox}}{a_{Rd}}, \quad (1.50)$$

где E'_0 — стандартный окислительно-восстановительный потенциал; a_{Ox} и a_{Rd} — активная концентрация окислительных (Ox) и восстановительных (Rd) ионов в растворе. Значение упомянутого диффузионного потенциала зависит от природы соприкасающихся растворов, их концентраций, скорости истечения и других факторов. В настоящее время известно большое число конструкций электродов для потенциометрии. На рис. 11.19 приведены наиболее распространенные схемы измерительных (рис. 11.19, а — з) и сравнительного (рис. 11.19, д) электродов.

Наиболее широкое применение в практике аналитического контроля химико-технологических процессов имеют так называемые ионоселективные электроды (рис. 11.19, а — в) [25]. Характерной особенностью ионоселективных электродов является то, что в электродных реакциях не участвуют электроны, а основной является реакция обмена ионами между растворами, разделенными мембраной, обладающей селективной проницаемостью для одного типа ионов. Если в выражении (1.49), описывающем разность потен-

циалов на мембране, принять, что активная концентрация a_x является измеряемой величиной (первый раствор, омывающий мембрану, является анализируемой жидкостью) и для некоторого i -го иона, находящегося в анализируемой жидкости, $a_1 = a_i$, а активная концентрация a_2 этого же иона во втором растворе постоянна и равна $a_{i \text{ ст}}$, т. е. в качестве

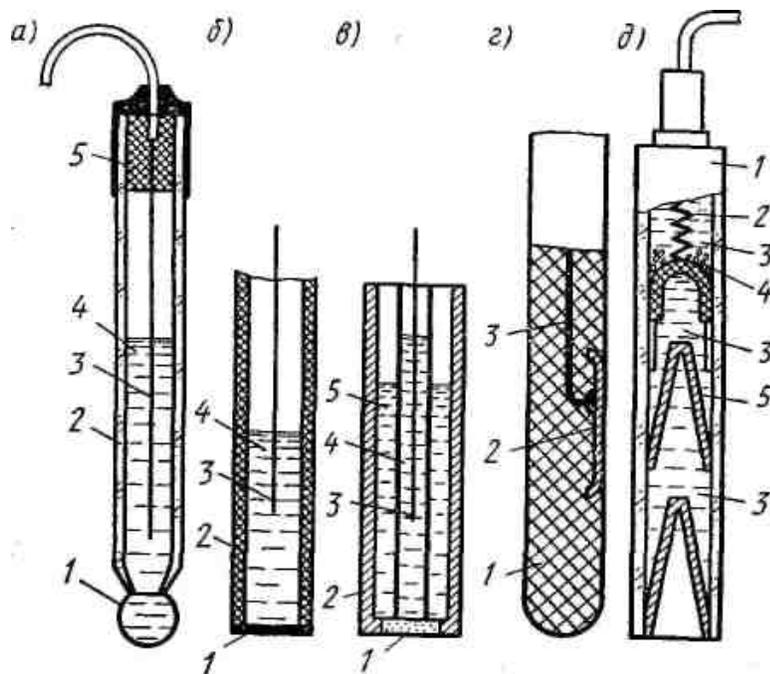


Рис. 11.19. Конструкции измерительных и сравнительных электродов потенциметрических анализаторов жидкостей

второго раствора используется некоторое стандартное вещество, то (11.49) можно преобразовать к виду

$$E_M = \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_i}{a_{i \text{ ст}}} = E_{\text{ст}} + \frac{RT}{nF} \ln a_i, \quad (1.51)$$

где $E_{\text{ст}} = -\frac{RT}{nF} \ln a_{i \text{ ст}}$ — постоянный потенциал.

Выражение (11.51) описывает потенциал ионоселективного электрода при наличии в анализируемой жидкости только одного типа ионов того же знака и заряда, что и i -й ион, или в идеальном случае при наличии других ионов в анализируемом растворе. В общем случае потенциал ионоселективного электрода при наличии в анализируемой жидкости j -го иона того же знака и заряда, что и i -й ион, описывается уравнением Никольского

$$E_M = E_{\text{ст}} + \frac{RT}{nF} \ln(a_i + K_{ij} a_j), \quad (1.52)$$

где K_{ij} — коэффициент селективности электрода, служащего для определения i -го иона, к j -му; a_j — активная концентрация j -го иона в анализируемой жидкости.

Из выражения (11.52) следует, что для селективного измерения активной концентрации i -го иона необходимо в общем случае иметь $K_{ij} \ll 1$.

Одним из наиболее распространенных ионоселективных электродов является стеклянный электрод (рис. 11.19, *a*), который применяется для измерения активной концентрации ионов водорода H^+ и ионов натрия Na^+ . Корпус стеклянного электрода представляет собой стеклянную трубку 2, к нижнему концу которой припаяна мембрана 1 (сферическая, конусообразная или плоская) толщиной 0,06—0,1 мм, изготовленная из специальных сортов стекла. Верхний конец трубки закрыт пробкой 5. Внутренняя полость трубки заполнена жидкостью 4 (обычно раствором 0,1 н. HCl с кристаллами AgCl), называемой приэлектродной. Она выполняет функцию стандартного вещества и имеет постоянную активную концентрацию определяемого иона. В указанную жидкость погружен вспомогательный электрод 3 (контактный полуэлемент), представляющий собой серебряную проволочку, покрытую AgCl или AgBr (хлорсеребряный или бромсеребряный электроды).

Стекло мембран обычно состоит из оксидов элементов III и V групп периодической системы (например, Al, Si) и оксидов элементов I и II групп (например, Na, Ca) и имеет трехмерную решетку, в которой наиболее подвижными переносчиками зарядов являются однозарядные катионы, что определяет селективную проницаемость стеклянных мембран для этих ионов. Способность стеклянных электродов избирательно реагировать на активную концентрацию ионов водорода и натрия достаточно хорошо изучена. Однако единой теории, объясняющей природу этих свойств, пока нет. Обычно это свойство объясняется либо проницаемостью стекла для ионов водорода H^+ , либо адсорбцией ионов H^+ на поверхности. Электрическое сопротивление стеклянных электродов, определяемое сопротивлением их мембраны, велико и составляет 100—1000 МОм, что делает необходимым использование для измерения электродного потенциала измерительных устройств с высоким входным сопротивлением.

Кроме электродов со стеклянными мембранами в настоящее время в практику аналитического контроля широко внедряются ионоселективные электроды с твердыми и жидкими мембранами.

На рис. 11.19, *б* приведена схема ионоселективного электрода с твердой мембраной. Он содержит корпус 2 из электроизоляционного материала, вспомогательный электрод 3, погруженный в приэлектродную жидкость 4, и твердую мембрану 1. Различают электроды с твердыми гомогенными (от греч. *homogenes* — однородной) и гетерогенными (неоднородными) (от греч. *heteros* — другой и *genos* — род) мембранами. Твердые гетерогенные мембраны изготавливают из кристаллических соединений, обладающих ионной проводимостью. В процессе переноса заряда через такую мембрану участвует только один ион кристаллической решетки, имеющий наименьший радиус и наименьший заряд. Распространенным электро-

дом такого типа является электрод с мембраной из фторида лантана LaF_3 , который обладает высокой селективностью к ионам фтора и поэтому широко применяется для контроля их активной концентрации в растворах. Электроды с твердыми гомогенными мембранами применяются также для измерения активных концентраций ионов Ag^+ , S^+ , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cd^{2+} и др.

Твердые гетерогенные мембраны изготавливают из связующего вещества — инертной матрицы (парафин, коллодий, поливинилхлорид, полистирол, полиэтилен, силиконовый каучук), в которой закреплено активное вещество.

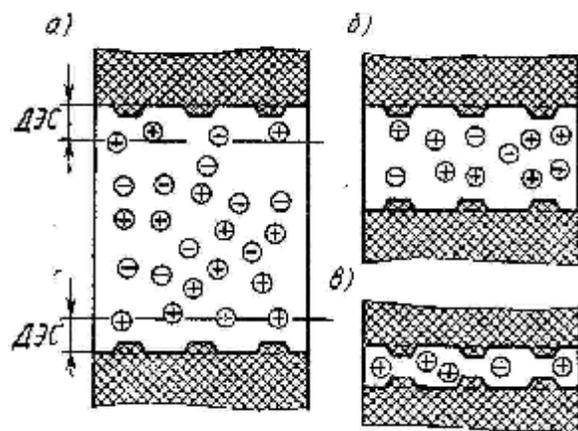


Рис. 11.20. Схемы мембранных пор с фикс-мембран, заполненных водой, с фиксированными зарядами на поверхности

Фиксированные анионы в порах электростатически взаимодействуют с имеющимися в ней ионами. У поверхности пор образуются диффузионные двойные электрические слои ДЭС (рис. 11.20, а) с анионами, фиксированными в порах мембран, и катионами у поверхности. При значительном диаметре пор основное их пространство заполнено анионами и катионами, содержащимися в растворах, разделенных мембраной.

В порах меньшего размера (рис. 11.20, б) число анионов меньше числа катионов, при некотором еще меньшем значении диаметра пор (рис. 11.20, в) в них полностью отсутствуют ионы, имеющие тот же знак, что и ионы, фиксированные в порах мембраны. Поэтому электрический контакт между жидкостями, разделяемыми мембранами, имеющими такие поры, осуществляется только посредством ионов, имеющих знак, противоположный знаку ионов, фиксированных в порах мембраны (в рассматриваемом случае посредством катионов).

В настоящее время разработано большое число ионоселективных электродов с гетерогенными твердыми мембранами, которые позволяют с достаточной во многих практически важных случаях избирательностью измерять концентрацию ионов K^+ , Na^+ , Ca^{2+} ,

В качестве активных веществ используются в основном трудно-растворимые соли металлов: оксалат и стеарат кальция, сульфат бария, тетрафенилборат калия, соли фтора, галогениды серебра и др. Для рассматриваемых мембран характерна пористая структура, чем объясняется эффект их избирательной проницаемости. На рис. 11.20 показаны схемы пор различного диаметра катионообменной мембраны.

Фиксированные анионы в порах электростатически взаимодействуют с имеющимися в ней ионами.

Ba^{2+} , Ni^{2+} , ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$), Cd^{2+} , F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^- , CN^- , ClO_4^- , I^- , SO_4^{2-} и др.

Конструкция ионоселективного электрода с жидкой мембраной показана на рис. 11.19, в. Отличие такого электрода от рассмотренных состоит в том, что он содержит пористую или целлюлозную мембрану 1, которая пропитывается жидким органическим ионитом 5, проникающим в ее поры. Все остальные элементы на рис. 11.19, д имеют такое же назначение, что и для рассмотренных уже электродов. Органический ионит не смешивается с разделяющими его анализируемым водным раствором и приэлектродной жидкостью 4. Селективность жидких мембран определяется тем, что ионы определяемого компонента, содержащиеся в органическом ионите, гидрофильны, т. е. способны взаимодействовать с анализируемым водным раствором и переходить в него, а противоионы органического ионита гидрофобны и поэтому не способны переходить из ионита в анализируемую водную среду.

Ионоселективные электроды обеспечивают измерение концентрации от 10^{-6} до нескольких моль/л и имеют электрическое сопротивление в пределах 0,02—40 МОм.

Конструкция металлического электрода, используемого в потенциометрических измерениях и, в частности, для контроля окислительно-восстановительного потенциала, показана на рис. 11.19, з. На пластмассовом корпусе 1 укреплена полоска 2 из благородного металла (золото, платина, серебро, иридий), к которой припаян проводник 3. Известны конструкции металлических электродов, в которых слой металла нанесен на поверхность корпуса 1 путем напыления.

В качестве сравнительных электродов в потенциометрических анализаторах используются металлические электроды. В силу того, что в потенциометрическом анализаторе сравнительный электрод служит для создания «опорного потенциала», он изолируется от анализируемой среды, а электрические связи его со средой осуществляются через раствор электролита постоянного состава (так называемый электролитический ключ).

Наиболее широкое применение в потенциометрических анализаторах имеют хлорсеребряный электрод (см. рис. 11.19, д). Он имеет стеклянный корпус 1, во внутренней полости которого расположен серебряный электрод 2, помещенный в 3,5 н. раствор 3 хлористого калия. Постоянный потенциал серебряного электрода обеспечивается наличием избытка хлористого серебра, которое в виде пасты 4 из кристаллов последнего располагается в верхнем отсеке электрода. Эластичные резиновые мембраны 5 предохраняют электрод от попадания внутрь его посторонних ионов из анализируемой жидкости при погружении в него электрода.

Электрический контакт между анализируемой жидкостью и раствором хлористого калия обеспечивается через кольцевые зазоры. Между внутренней поверхностью корпуса 1 и резиновыми мембранами 5 в местах прилегания последних к поверхности. Изменение

объема жидкости, заполняющей электрод, при изменениях температуры компенсируется за счет деформации резиновых мембран.

Рассмотренные конструкции измерительных и сравнительных электродов

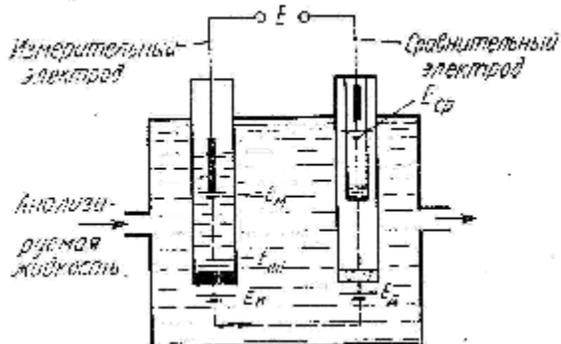


Рис. 11.21. Электрическая схема гальванической ячейки потенциометрических анализаторов жидкостей

позволяют сделать вывод о том, что в работе гальванической ячейки потенциометрического анализатора в общем случае используются все перечисленные потенциалы. Электрическая схема гальванической ячейки потенциометрических анализаторов концентрации ионов показана на рис. 11.21. Сигнал такой ячейки определяется алгебраической суммой всех потенциалов, возникающих

в электрической цепи этой ячейки:

$$E = E_m + E_{вн} + E_n + E_d + E_{ср} \quad (11.53)$$

где E_m — потенциал внутренней вспомогательного электрода; $E_{вн}$ — потенциал, возникающий между внутренней поверхностью мембраны измерительного электрода и приэлектродной жидкостью; E_d — диффузионный потенциал на границе между анализируемой жидкостью и жидкостью, в которую погружен сравнительный электрод.

Потенциалы E_m и $E_{ср}$ описываются выражением (11.47), разности потенциалов $E_{вн}$ и E_n — выражением (11.51) или (11.52).

Все потенциалы, определяющие сигнал рассматриваемой гальванической ячейки, кроме E_n и $E_{ср}$, постоянны в процессе измерения и зависят только от температуры. Потенциалы E_n и E_d изменяются при изменении концентрации определяемых ионов в анализируемой жидкости. Однако если изменение E_n несет измерительную информацию, то изменение E_d является источником погрешности измерения. Поэтому обычно стремятся по возможности уменьшить значение (до 1—4 мВ) диффузионного потенциала и сделать его существенно меньшим (на 1—2 порядка) потенциала E_n . При таком условии изменения E_d в процессе измерения будут оказывать меньшее влияние на его результаты. Таким образом, сигнал гальванической ячейки потенциометрического анализатора, предназначенного для измерения активной концентрации ионов с учетом (11.51) и (11.53), можно представить в виде

$$E = E^* + \frac{RT}{nF} \ln a_i, \quad (1.54)$$

где $E^* = E_m + E_{вн} + E_d + E_{ср}$.

Выражение (11.54) в практике обычно записывают, используя десятичный логарифм:

$$E = E^* + 2,3 \frac{RT}{nF} \lg a_i . \quad (1.55)$$

Аналогично по структуре выражение, описывающее сигнал гальванической ячейки при измерении окислительно-восстановительного потенциала. Причем в качестве термина «окислительно-восстановительный» потенциал часто используют термин «окислительный» потенциал, предусматривая для этого потенциала положительный по отношению к нулю знак электрода. Как видно из выражения (11.55), зависимость сигнала гальванической ячейки от активной концентрации является нелинейной. При этом значения концентраций, измеряемых потенциометрическими анализаторами, составляют 10^{-2} — 10^{-7} г-ион/л. В связи с этим в 1907 г. датский химик Серенсен для выражения концентрации ионов водорода в растворах ввел понятие рН (р — первая буква слова *Potenz* — степень, Н — химический символ водорода), которое определяется как отрицательный десятичный логарифм активной концентрации водородных ионов:

$$\text{pH} = - \lg a_i \quad (11.56)$$

С учетом (11.56) выражение (11.55) можно представить в виде

$$E = E^* - 2,3 \frac{RT}{nF} \text{pH} . \quad (1.57)$$

Таким образом, сигнал гальванической ячейки связан с величиной рН линейно, а сама эта величина является мерой активной концентрации (грамм-ионов, содержащихся в 1 л анализируемой жидкости).

Концентрация водородных ионов в дистиллированной воде равна 10^{-7} г-ион/л, и таким же является число ионов OH^- (вода диссоциирует на ионы H^+ и OH^-). Поэтому для дистиллированной воды $\text{pH}=7$. Растворы с $\text{pH}<7$ являются кислыми, а растворы $\text{pH}>7$ — щелочными.

Удобство водородного показателя рН определило тот факт, что в настоящее время аналогичное понятие, а именно показатель рХ, используется для выражения активной концентрации самых различных ионов при потенциометрических измерениях с использованием ионоселективных электродов. При потенциометрическом определении окислительно-восстановительных свойств жидких веществ используют понятие еН.

Основной влияющей величиной при потенциометрических измерениях является температура. С изменением температуры анализируемой жидкости изменяются потенциалы измерительного и сравнительного электродов. Сигнал гальванической ячейки потенциометрического анализатора с увеличением температуры по абсолют-

ной величине увеличивается в первом приближении по линейному закону.

Для измерения сигнала гальванического элемента потенциметрического анализатора используют измерительные приборы и нормирующие измерительные преобразователи.

Основное требование к этим измерительным устройствам — наличие высокого входного сопротивления. Так, при измерении рН и рХ оно должно составлять 500—1000 МОм. При измерении еН достаточным является входное сопротивление 1—10 МОм.

На рис. 11.22 приведены наиболее типичные схемы промышленных потенциметрических анализаторов жидкостей.

В потенциметрическом анализаторе (рис. 11.22, а), который содержит гальваническую ячейку 3 с измерительным 1 и сравнительным 2 электродами, измерение сигнала последней осуществляется с помощью специального автоматического потенциометра с реохордом R_p ,

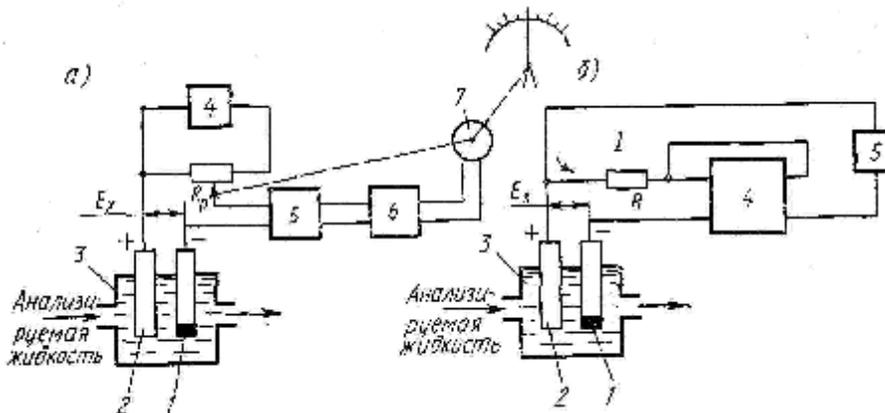


Рис. 11.22. Схемы потенциметрических анализаторов жидкостей

питающимся от стабилизированного источника постоянного тока 4. При измерении сигнал гальванической ячейки сравнивается с падением напряжения по реохорду. Отличие этого потенциометра от описанного в § 6.6 состоит в том, что кроме усилителя переменного тока 6, реверсивного двигателя 7 и других узлов он содержит электрометрический усилитель 5, имеющий входное сопротивление 600 МОм.

Потенциметрический анализатор (рис. 11.22, б) содержит гальваническую ячейку 3 с измерительным 1 и сравнительным 2 электродами, сигнал которой в процессе измерения сравнивается с падением напряжения на сопротивлении R , создаваемом током I . Последний унифицирован по значению и возникает в выходной цепи усилителя 4, имеющего высокое входное сопротивление. Таким образом, сигнал гальванической ячейки преобразуется в унифицированный сигнал промежуточным (нормирующим) преобразователем,

принцип действия которого аналогичен рассмотренному в § 6.6. Унифицированный токовый сигнал измеряется вторичным прибором 5.

Известны схемы потенциометрических анализаторов, в которых предусмотрена коррекция показаний в зависимости от температуры анализируемой жидкости [1].

Потенциометрические автоматические анализаторы рН имеют диапазон измерений от 0—1 до 0—14 рН и время реакции 15—30 с, а анализаторы рХ — диапазоны измерений от 0—1 до 0—5 рХ и время реакции 5—10 мин. Классы точности потенциометрических анализаторов 0,5—10.

§ 11.14. Электролизные анализаторы

Явление электролиза в жидких электролитах используется в работе большой группы электрохимических анализаторов жидкостей и газов, которые для упрощения изложения в данной книге объединены понятием «электролизные анализаторы» [21]. К этим анализаторам относятся полярографические или вольт-амперметрические, амперметрические и кулонометрические. Получение измерительной информации этими анализаторами соответственно базируется на определении в специальных электролитических ячейках зависимости между силой тока и напряжением, силой тока и количеством электричества.

Ток, проходящий через электролитическую ячейку при постоянном потенциале на электродах, в большинстве случаев зависит в основном от процесса переноса определяемого компонента к электроду. Этот перенос определяется скоростью диффузии указанного компонента, которая происходит в небольшом по толщине диффузионном слое, расположенном около электрода. Этот слой сохраняется у поверхности электрода даже при турбулентном режиме течения жидкости около электрода. По этой причине упомянутый ток принято называть диффузионным, а его предельное значение, имеющее место при определенном потенциале электрода, при увеличении которого ток не изменяется,— предельным диффузионным током.

Электролизные анализаторы различных типов и конструкций находят широкое применение в лабораторных анализах жидкостей и газов. В практике автоматического аналитического контроля в настоящее время они нашли применение в основном для анализа газов. Чаще других используются гальванические, деполяризационные и кулонометрические газоанализаторы. Первые два обычно рассматривают как полярографические анализаторы и используют для измерения концентрации кислорода в многокомпонентных газовых смесях.

В *гальванических газоанализаторах* имеется гальванический элемент (электролитическая ячейка) с щелочным электролитом и двумя электродами: свинцовым анодом и серебряным катодом. Катод

располагается в электролите в полусмоленном состоянии. Разность электродных потенциалов указанных электродов определяет потенциал, приложенный к электролитической ячейке, так как в данном случае в данной ячейке имеется внутренний источник электрической энергии.

Электролит предварительно насыщается анализируемым газом. Сигналом такого газоанализатора является ток, протекающий между электродами по внешней цепи и определяемый электрохимической реакцией деполяризации катода. Частично погруженный в электролит серебряный электрод обеспечивает процесс переноса кислорода за счет его ионизации на границе раздела трех фаз (электролит — электрод—анализируемый газ) из газовой фазы в электролит. При этом в гальваническом элементе при замкнутой внешней цепи протекают следующие реакции:

на катоде $O_2 + 2H_2O + 4e^- = 4OH^-$,

на аноде $2Pb + 4OH^- \rightarrow 2Pb(OH)_2 + 4e^-$.

Конструктивное оформление гальванических газоанализаторов весьма разнообразно [21]. В гальваническом газоанализаторе (рис. 11.23, а) анализируемый газ с постоянным объемным расходом подается по трубке 1, нижний конец которой опущен в электролит 5. На трубке 1 размещен гальванический элемент, содержащий: анод 2, изготовленный из свинцовой фольги, чулок 3 из пористой пластмассы, пропитанной 5%-ным раствором КОН, и серебряная сетка 4. Газ, барботируя через электролит, подхватывает его и в виде капель и пара транспортирует к гальваническому элементу, что обеспечивает постоянство пропитки пористого пластмассового чулка электролитом. Трубка и гальванический элемент размещены в стеклянном корпусе 6.

Гальванические газоанализаторы используются для измерения концентрации кислорода в различных многокомпонентных газовых смесях. Диапазоны измерений от 0—0,001 до 0—0,02% об. Классы точности 5—10, Время реакции 0,5—3 мин. При больших, чем приведенные, концентрациях кислорода статическая характеристика гальванических газоанализаторов становится нелинейной.

Другая распространенная конструкция гальванических газоанализаторов схематично показана на рис. 11.23, б. Анализаторы такого типа находят применение для контроля принципиально любых

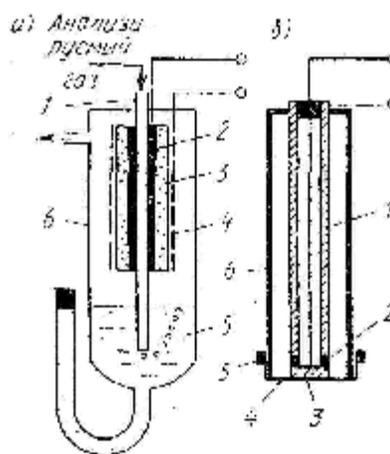


Рис. 11.23. Схемы гальванических газоанализаторов

концентраций кислорода в газах, а также для измерения концентрации кислорода, растворенного в жидкостях [34]. Такие возможности достигаются за счет использования подачи газа к гальваническому элементу через диффузионный барьер. Гальванический элемент содержит алюминиевый анод 1, выполненный в виде трубки, и платиновый катод 3, отделенные друг от друга резиновой прокладкой 2. Катод прижат к фторопластовой мембране 4, укрепленной с помощью резинового кольца на корпусе 6. Толщину фторопластовой мембраны подбирают в зависимости от максимально возможного значения концентрации кислорода в анализируемой смеси. Обычно она составляет 10—30 мкм. При работе газоанализатора анализируемый газ диффундирует через мембрану в электролит и таким образом попадает в гальванический элемент. Мембрана в этих анализаторах выполняет функции делителя концентрации. Класс точности таких газоанализаторов 5—10, время реакции 5—15 мин.

Действие депполяризационных газоанализаторов, обычно используемых для измерения концентрации кислорода, основано на депполяризации кислородом поляризованного электрода электролитической ячейки, между электродами которой приложена некоторая внешняя разность потенциалов.

Схема депполяризационного газоанализатора показана на рис. 11.24, а. Анализируемый газ из блока подготовки 1 с постоянным объемным расходом поступает в абсорбер 5, заполненный раствором электролита.

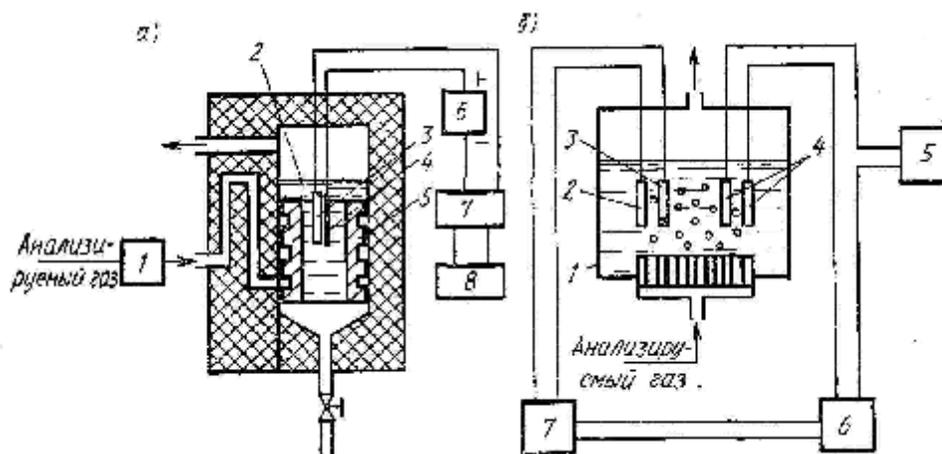


Рис. 11.24. Схемы депполяризационного (а) и кулонометрического (б) газоанализаторов

Здесь электролит насыщается газом при движении последнего по винтовому каналу и транспортируется в верхнюю часть 2 абсорбера, где размещены золотые электроды электролитической ячейки: анод 4, представляющий собой проволоку, и катод 3, выполненный в виде пластины, изогнутой гармошкой. К электродам приложено поляризационное напряжение от стаби-

лизированного источника ϵ ($1,95 \pm 0,2$) В. При поступлении к катоду растворенного в электролите кислорода этот электрод частично деполяризуется, что вызывает появление тока во внешней цепи, значение которого пропорционально концентрации кислорода в анализируемом газе. Ток преобразуется преобразователем 7 в унифицированный сигнал, воспринимаемый потенциометром 8.

На катоде электролитической ячейки протекают следующие электрохимические реакции:

при использовании щелочного электролита



при использовании кислого электролита



Деполяризационные газоанализаторы кислорода имеют диапазоны измерений от 0—0,01 до 0—10% об., классы точности 5—10, время реакции 1—1,5 мин.

Рассмотренные полярографические газоанализаторы используются иногда для измерения концентраций SO_2 , Cl_2 и других газов [21].

В основе работы *кулонометрических газоанализаторов* лежит закон Фарадея, устанавливающий связь между количеством прореагировавшего в электролитической ячейке вещества и количеством прошедшего через него электричества Q :

$$m = \mu Q / (Fn) \quad \text{или} \quad m = \mu It / (Fn) \quad (11.58)$$

где μ — молекулярная масса вещества; I — сила тока; t — время прохождения тока.

Кулонометрические газоанализаторы строят по методу уравновешивающего преобразования. Кулонометрические газоанализаторы этого типа (рис. 11.24, б) содержат измерительную камеру, заполненную электролитом, в которой размещен измерительный электрод 3 и электрод сравнения 2, а также два генераторных электрода, служащих для генерации путем электролиза ионов вещества (титранта), способных вступать в реакцию с ионами определяемого компонента. Электроды 2 и 3 подключены к рН-метрическому преобразователю 7. Анализируемый газ поступает в измерительную ячейку 1, где, растворяясь, переходит в электрохимически активную форму, т. е. преобразуется в ионы. Сила тока в цепи электродов 4 автоматически поддерживается такой, чтобы из раствора выделялось количество ионов титранта, достаточное для нейтрализации электролита, что соответствует полному связыванию всех ионов определяемого компонента, содержащихся в текущий момент в электролите, которое пропорционально содержанию определяемого компонента в анализируемом газе. Автоматическое поддержание тока, требуемого для нейтрализации электролита, осуществляется системой автоматического регулирования, состоящей из электродов 2 и 3, рН-метрического преобразователя 7 и пропорционального регуля-

тора 6. Ток в цепи электродов 4 измеряется вторичным прибором 5 и служит мерой концентрации определяемого компонента в анализируемом газе.

Кулонометрические газоанализаторы применяются для измерения концентрации в газовых смесях следующих газов: CO_2 , H_2S , SO_2 , HCl , O_3 , NH_3 , O_2 и др. Диапазоны измерений этих газоанализаторов от $0-1 \cdot 10^{-4}$ до $0-0,5\%$ об. (в зависимости от анализируемого вещества).

§ 11.15. Пламенные ионизационные и фотометрические газоанализаторы

Химическая реакция окисления горючих веществ, протекающая в пламени, сопровождается рядом эффектов, которые используются для получения измерительной информации. Так, тепловой эффект этой реакции используется в работе калориметров (см. § 10.5) газов. Эффекты ионизации и возникновение электромагнитного излучения применяются для измерения концентраций некоторых веществ в многокомпонентных смесях.

На рис. 11.25, а приведена схема пламенного ионизационного газоанализатора, в котором анализируемый газ и водород, служащий для поддержания пламени, подаются из блока подготовки газов 1 с постоянными объемными расходами в миниатюрную горелку 3. Последняя установлена в корпусе 4 на изоляторе 6. Воздух, необходимый для горения водоро-

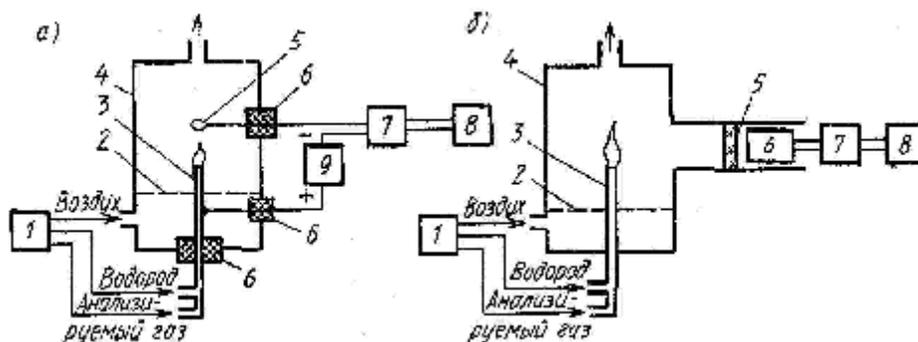


Рис. 11.25. Схемы пламенных газоанализаторов

да, с постоянным объемным расходом, поступает в камеру 4 через распределитель 2. Над горелкой на фторопластовом изоляторе 6 установлен коллекторный электрод 5 из платины или нихрома. Между горелкой 3 и коллекторным электродом 5 прикладывается электрическое поле от источника 9 напряженностью $150-200$ В/см. При сгорании чистого водорода почти не образуется ионов (сопротивление водородного пламе-

ни порядка 10^{16} Ом). Органические вещества (газы и пары) содержащиеся в анализируемом газе, попадая в водородное пламя, сгорают и вызывают резкое увеличение ионного тока. Последний преобразуется в унифицированный сигнал преобразователя 7 с большим входным сопротивлением (10^8 — 10^9 Ом), а сигнал последнего воспринимается автоматическим потенциометром 8.

Физические основы работы плазменных ионизационных анализаторов изучены еще недостаточно полно. Установлено, что его сигнал, определяемый ионным током между горелкой и коллекторным электродом, для углеводородов при концентрациях в анализируемом газе, не превышающих 0,5—1% об., зависит от числа атомов углерода в молекуле:

$$U = k_n n c, \quad (11.59)$$

где k_n — коэффициент преобразования пламенного ионизационного анализатора по физико-химическому свойству (см. § 11.1); c — объемная концентрация определяемого компонента в анализируемом газе. Для углеводородов с числом атомов углерода, превышающим 6, выражение (11.59) с достаточной для практики точностью заменяют выражением

$$U = k_n k_1 m c = k_n k_1 \frac{m}{V_m} V_m c = k_n k_1 V_m r c. \quad (1.60)$$

где k_1 — постоянный коэффициент; m — молекулярная масса определяемого компонента; V_m — объем 1 моль и ρ плотность определяемого компонента в газовой фазе при нормальных условиях. При постоянных расходах газовых потоков в пламенном ионизационном газоанализаторе выражение (11.60) можно представить в виде

$$U = K c_m, \quad (11.61)$$

где $K = k_n k_1 V_m$; $c_m = \rho c$ — массовая концентрация определяемого компонента в анализируемой газовой смеси, выраженная в (ед. массы)/(ед. объема).

Зависимость (11.61) справедлива для многих углеводородов и для их смесей. Поэтому пламенные ионизационные газоанализаторы применяются как для измерения микроконцентрации в воздухе индивидуальных углеводородных газов и паров жидкостей, так и для измерения их суммарной массовой концентрации, выраженной в приводимых выше единицах. Диапазоны измерений от 0—1 до 1—100 мг/м³; классы точности 5—15; время реакции 10—20 с. Пламенные ионизационные газоанализаторы находят широкое применение в газовой хроматографии (см. гл. 12).

Эффекты изменения интенсивности и спектрального состава излучения пламени положены в основу работы пламенных фотометрических газоанализаторов (рис. 11.25, б). Схема подачи газов в этом анализаторе аналогична рассмотренной (рис. 11.25, а). При сгорании в пламени паров фосфор-, серу- или галогенсодержащих

веществ, содержащихся в анализируемом газе, существенно изменяется интенсивность излучения. Фотопоток поступает в фотоумножитель 6 через монохроматический фильтр 5, длину волны которого принимают равной 526, 394 или 589 нм при измерении концентраций фосфор-, серу- и галогенсодержащих соединений соответственно. Сигнал фотоумножителя преобразуется в унифицированный сигнал с помощью преобразователя 7 и воспринимается автоматическим потенциометром 8. Пламенные фотометрические газоанализаторы могут применяться для анализа жидких веществ. С этой целью газоанализатор снабжен специальной горелкой, в которой анализируемое жидкое вещество перед сгоранием распыляется потоком газа.

§ 11.16. Хемилюминесцентные газоанализаторы

Принцип действия хемилюминесцентных газоанализаторов основан на явлении люминесценции, которое сопровождает некоторые химические реакции. Такую люминесценцию называют хемилюминесценцией. В хемилюминесцентном газоанализаторе (рис. 11.26) анализируемый газ и воздух с постоянными объемными расходами из блока подготовки газов 1 поступают в реакционную камеру 2. Воздух предварительно проходит через озонатор 7, где под действием барьерного высоковольтного разряда в воздухе образуется озон. При взаимодействии в камере 2 озона с определяемым компонентом анализируемой смеси образуются продукты реакции в возбужденном состоянии. При переходе их в устойчивое состояние происходит излучение квантов люминесценции. Электромагнитное излучение через окно 3 попадает в фотоумножитель 4, сигнал которого преобразуется в унифицированный сигнал с помощью преобразователей 5. Выходной сигнал последнего воспринимается авто-

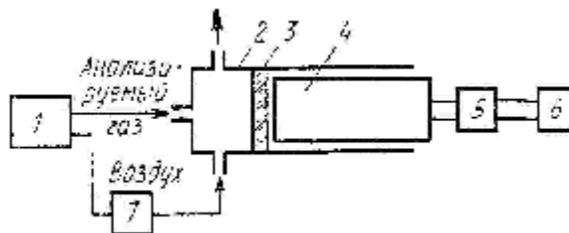


Рис. 11.26. Схема хемилюминесцентного газоанализатора

матическим потенциометром 6. При постоянной концентрации озона в воздухе, поступающем в камеру 2, интенсивность электромагнитного излучения пропорциональна концентрации определяемого компонента в анализируемом газе. При такой подаче газов хемилюминесцентный газоанализатор может использоваться для селективного измерения микроконцентраций (в диапазонах от $0-10^{-5}$ до $0-10^{-4}$ % об. и более) непредельных углеводородов и оксидов азота. Он может применяться для селективного измерения микроконцентраций озона в воздухе. В этом случае воздух поступает в реакционную камеру 2, минуя озонатор, а вместо анализируемого газа в камеру с постоянным объемным расходом подается этилен.

§ 11.17. Системы автоматического контроля загрязнений окружающей среды

Проблема эффективного контроля и защиты окружающей среды от загрязнений приобрела чрезвычайную актуальность. Основной причиной интенсивного загрязнения воздушного и водного бассейнов является противоречие между быстро растущим объемом производства во всех областях мировой экономики и медленным внедрением новой прогрессивной технологии, эффективных очистных установок и средств контроля загрязнений окружающей среды.

Загрязнение воздуха и водного бассейна на предприятиях, где используются химико-технологические процессы, связано в основном с выделениями и выбросами вредных веществ из оборудования, плохой работой очистных установок, фискального хозяйства и сжиганием топлив (газа, мазута) в огневых нагревателях химико-технологических процессов.

В нефтехимическом производстве наиболее типичными загрязнителями воздушного бассейна являются: сероводород, диоксид серы, оксид углерода, диоксид углерода, углеводороды, оксиды азота, сажа и др. Гамма веществ, являющихся загрязнителями водного бассейна, весьма разнообразна и зависит в основном от используемых в конкретном процессе реагентов и сырья.

Успешное решение проблемы охраны окружающей среды возможно только при наличии средств, обеспечивающих получение информации о загрязнениях воздушного и водного бассейнов. В настоящее время многие фирмы, научно-исследовательские и конструкторские организации в нашей стране и за рубежом разрабатывают и выпускают различные средства контроля загрязнений окружающей

Таблица 11.1

Автоматические анализаторы систем контроля загрязнений атмосферы

Измеряемый компонент	Анализатор	Минимальный диапазон измерений, млн ⁻¹
Оксид углерода	Инфракрасный абсорбционный	0—50
Оксид азота	Хемиллюминесцентный, пламенный фотометрический, инфракрасный абсорбционный	0—0,5
Оксиды азота (сумма)	Хемиллюминесцентный, пламенный фотометрический	0—0,5
Диоксид азота	То же	0—0,5
Озон	Хемиллюминесцентный	0—0,1
Диоксид серы	Кондуктометрический с предварительным поглощением газа жидкостью	0—0,2
Углеводороды	Пламенный ионизационный	0—10
Сероводород	Пламенный фотометрический	0—0,1 мг/м ³

Автоматические анализаторы систем контроля загрязнений вод

Измеряемый компонент	Анализатор	Минимальный диапазон измерений
Содержание: растворенного кислорода	Гальванический	0—5 млн ⁻¹
углерода (суммы)	Инфракрасный абсорбционный с предварительным дожиганием до CO ₂	0—5 мг/л
диоксида углерода	Потенциометрический с ионосе- лективным электродом	0—10 ⁻⁴ моль
хлора	То же	0—10 ⁻⁶ моль
фтора	»	0—10 ⁻⁶ моль
сероводорода	»	0—10 ⁻⁶ моль
аммония	»	0—10 ⁻⁶ моль
Электрическая проводимость	Кондуктометрический	0—2000 мкСм/см
Окислительно- восстановительный потенциал	Потенциометрический	0—70 мВ
Концентрация водородных ионов	»	0—1 ед. рН

среды, в том числе автоматические системы (станции), основой которых являются автоматические анализаторы концентраций отдельных компонентов, рассмотренные выше. Находят применение стационарные и передвижные автоматические станции контроля загрязнений воздушного и водного бассейнов. Эти станции обеспечивают автоматический отбор проб, измерение выбранных параметров контролируемых сред, автоматическую проверку и корректировку нулевого уровня сигналов анализаторов и их автоматическую градуировку, регистрацию информации от анализаторов в аналоговой и цифровой формах, запись информации на магнитной ленте или перфоленте, передачу информации по радио или телефонной сети в центр контроля для дальнейшей обработки и использования, включение сигнала тревоги и отбор контрольных проб для дальнейшего исследования. Станции для контроля загрязнений водного бассейна снабжаются специальными устройствами для ультразвуковой очистки чувствительных элементов анализаторов.

Передвижные автоматические станции монтируются обычно на автобусах. Модульный принцип построения автоматических систем контроля загрязнений окружающей среды позволяет использовать самые различные автоматические анализаторы газов и жидкостей. Наиболее распространенные из них приведены в табл. 11.1 и 11.2.

ГЛАВА 12

АВТОМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СОСТАВА МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

§ 12.1. Задачи автоматического анализа состава многокомпонентных жидкостей и газов. Классификация методов анализа

Определение химического состава (в дальнейшем состава) жидких и газообразных сред — одна из сложнейших аналитических задач, для решения которой используется весь современный арсенал знаний физики, химии, физической химии и других наук.

Измерительная информация о составе жидких и газообразных сред в условиях химико-технологических процессов во многих случаях позволяет однозначно определить качество сырья, промежуточных и конечных продуктов.

В последнее время происходит коренное изменение в средствах и методах определения состава жидких и газообразных сред, используемых в химико-технологических процессах. На смену лабораторным химическим методикам приходят полуавтоматические лабораторные и автоматические промышленные средства анализа состава.

Задачи автоматического анализа состава жидких и газообразных сред на химико-технологических процессах решаются как при контроле сырья и продукции, так и при управлении ходом процесса.

При контроле качества сырья и продукции и выполнении связанных с ним товароучетных операций обычно определяется полный состав многокомпонентных жидких и газообразных сред. При управлении химико-технологическими процессами типичной является задача измерения концентрации одного или нескольких «ключевых» (определяемых) компонентов многокомпонентной среды. На основе информации о содержании ключевых компонентов строится управление химико-технологическим процессом. Для решения задачи измерения концентрации ключевых компонентов часто используют методы анализа полного состава многокомпонентной смеси, и из результатов анализа извлекают требуемую информацию о содержании ключевых компонентов.

Сложность современных методов и средств автоматического анализа состава многокомпонентных сред, их разнообразие и все время ужесточающиеся требования к регламенту химико-технологических процессов определяют тот факт, что во многих случаях еще не найдены удовлетворительные решения задачи анализа со-

става многокомпонентных сред, главным образом по скорости получения измерительной информации и точности измерений.

Современные методы автоматического анализа состава многокомпонентных жидких и газообразных сред (смесей) подразделяют на два класса: *многопараметрические методы* и *методы разделения*.

К многопараметрическим методам анализа состава относят метод различных свойств, метод различных условий и метод преобразований.

К методам разделения, используемым для анализа состава, относят: хроматографию, масс-спектроскопию и ректификацию.

Для автоматического анализа состава многокомпонентных смесей на химико-технологических процессах в настоящее время в основном применяется хроматография, а для решения простых задач иногда используются многопараметрические методы.

Анализ состава многопараметрическими методами сводится к проведению совокупных измерений (см. § 1.2 и 3.6), связанных с необходимостью решения системы уравнений. Поэтому точность многопараметрических методов принципиально ограничена и зависит от погрешности средств измерений, используемых для выполнения прямых измерений. Она существенно уменьшается с увеличением числа компонентов в многокомпонентной анализируемой смеси. Обычно многопараметрические методы при существующей погрешности автоматических анализаторов позволяют осуществлять анализ состава трех-четырех компонентных смесей. Серьезным недостатком всех многопараметрических методов является сложность измерительной установки или системы.

Методы разделения включают в себя предварительное разделение многокомпонентной смеси на отдельные компоненты и прямое измерение количества каждого из компонентов. Погрешность методов разделения определяется в основном погрешностью измерения количества любого компонента и не зависит от числа компонентов в анализируемой смеси. В этом, а также в универсальности методов разделения состоит их преимущество перед многопараметрическими методами.

Недостатком методов разделения по сравнению с многопараметрическими является существенная в некоторых случаях продолжительность измерения, связанная с необходимостью проведения процессов разделения.

§ 12.2. Многопараметрические методы и средства автоматического анализа состава

В общем случае анализ состава многокомпонентной анализируемой смеси многопараметрическими методами представляет собой совокупные измерения, при которых осуществляют по меньшей мере $n-1$ прямых измерений свойства анализируемой смеси. При этом под свойствами понимают физико-химическое свойство или пара-

метр анализируемой смеси. Результаты этих измерений, т. е. выходные сигналы используемых средств измерений, являются той измерительной информацией, которая необходима для выполнения анализа состава многопараметрическими методами. Эта измерительная информация, а также найденные путем предварительных исследований зависимости сигналов средств измерений от концентраций компонентов анализируемой смеси позволяют составить в общем виде следующую систему нелинейных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= F_1(c_1, c_2, \mathbf{L}, c_i, \mathbf{L}, c_n), \\ U_2 &= F_2(c_1, c_2, \mathbf{L}, c_i, \mathbf{L}, c_n), \\ &\mathbf{LLLLLLLLLLLL} \\ U_j &= F_j(c_1, c_2, \mathbf{L}, c_i, \mathbf{L}, c_n), \\ &\mathbf{LLLLLLLLLLLL} \\ U_{n-1} &= F_{(n-1)}(c_1, c_2, \mathbf{L}, c_i, \mathbf{L}, c_n), \\ 1 &= c_1 + c_2 + \mathbf{L} + c_i + \mathbf{L} + c_n, \end{aligned} \right\} \quad (12.1)$$

где $U_1, U_2, \dots, U_j, \dots, U_{(n-1)}$ — сигналы средств измерений, используемых для прямых измерений свойств анализируемой смеси; $c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n$ — концентрации компонентов анализируемой смеси; $F_1, F_2, \dots, F_j, \dots, F_{(n-1)}$ — символы функций, выражающих зависимость сигналов средств измерений от концентраций компонентов анализируемой смеси.

В результате решения системы уравнений (12.1) находят концентрации компонентов анализируемой смеси, т. е. определяют ее состав:

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= f_1(U_1, U_2, \mathbf{L}, U_j, \mathbf{L}, U_{(n-1)}), \\ c_2 &= f_2(U_1, U_2, \mathbf{L}, U_j, \mathbf{L}, U_{(n-1)}), \\ &\mathbf{LLLLLLLLLLLL} \\ c_i &= f_i(U_1, U_2, \mathbf{L}, U_j, \mathbf{L}, U_{(n-1)}), \\ &\mathbf{LLLLLLLLLLLL} \\ c_{(n-1)} &= f_{(n-1)}(U_1, U_2, \mathbf{L}, U_j, \mathbf{L}, U_{(n-1)}), \\ c_n &= 1 - (c_1 + c_2 + \mathbf{L} + c_i + \mathbf{L} + c_{(n-1)}), \end{aligned} \right\} \quad \begin{matrix} (12. \\ 2) \end{matrix}$$

где $f_1, f_2, \dots, f_j, \dots, f_{(n-1)}$ — символы функций, найденных при решении системы (12.1).

Чтобы решение системы (12.1) существовало, необходимо выполнение следующих условий: число уравнений системы (12.1) должно быть равно числу компонентов анализируемой смеси; все уравнения должны быть независимы друг от друга; все функции F_j и их производные по концентрациям всех компонентов должны существовать и быть непрерывными в области возможных решений системы (12.1), функциональный определитель (якобиан) системы уравнений (12.1) не должен быть тождественно равен нулю в области возможных решений этой системы уравнений.

Для многокомпонентной смеси газов или жидкостей, параметры которой являются аддитивными, запишем

$$P_{см} = \sum_{i=1}^n P_i c_i, \quad (12.3)$$

где $P_{см}$ – свойство многокомпонентной смеси; P_i – аналогичное свойство i -го компонента.

Как и в случае анализа бинарных смесей, аддитивными обычно считают физико-химические свойства или параметры многокомпонентных смесей газов и жидкостей в том случае, когда концентрация компонентов изменяется в узком диапазоне.

При условии, что все используемые для анализа свойства многокомпонентной смеси аддитивны, система уравнений (12.1) обращается в систему линейных алгебраических уравнений, вид которой будет рассмотрен ниже при изложении сущности конкретных многопараметрических методов анализа состава. Решение этой системы уравнений для концентрации любого из определяемых компонентов имеет вид

$$c_i = \sum_{l=1}^n A_l U_l + B_i \quad (12.3)$$

где A_i и B_i — постоянный коэффициент и величина для i -го компонента, определяемые расчетным путем по значениям коэффициентов системы линейных уравнений.

Для решения указанной системы уравнений используются электронные цифровые вычислительные машины, микропроцессорные системы (см. гл. 14) и аналоговые вычислительные Устройства. Последние обычно строятся по схеме, приведенной на рис. 12.1, для случая анализа трехкомпонентной смеси и обеспечивают представление

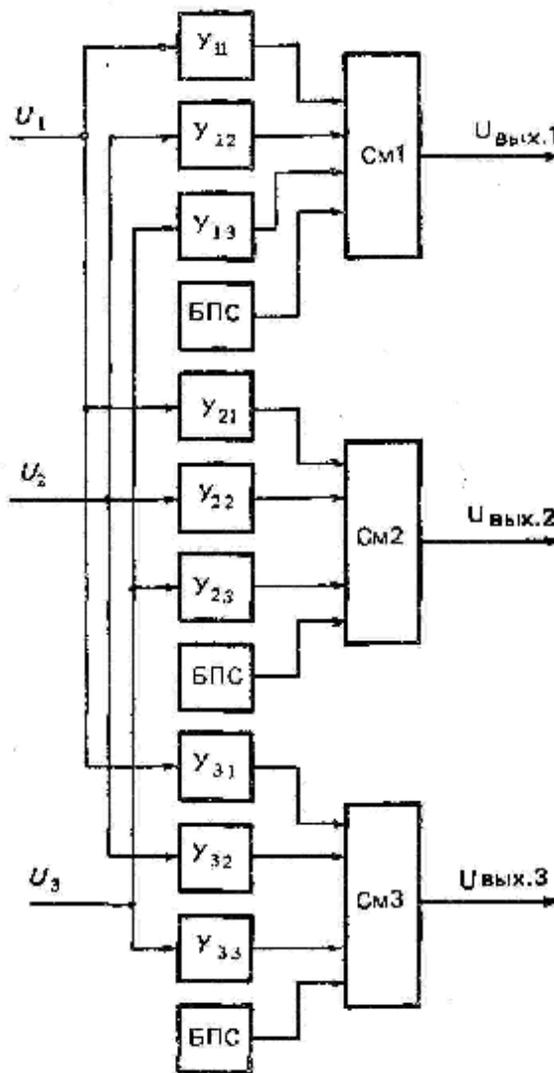


Рис. 12.1. Структурная схема аналогового вычислительного устройства для многопараметрических анализаторов состава: Y – масштабирующие усилители; $См$ – сумматоры; $БПС$ – блоки постоянных сигналов (для задания величин B_i)

информации о концентрации каждого из компонентов в виде

$$U_{\text{вых } i} = k_{\text{вы}} c_i = k_{\text{вы}} \left(\sum_{l=1}^n A_l U_l + B_i \right) \quad (12.5)$$

$U_{\text{вых } i}$ — выходной сигнал вычислительного устройства для i -го компонента; $k_{\text{вы}}$ — коэффициент преобразования вычислительного устройства.

Как видно из рис. 12.1 и выражения (12.5), обработка сигналов U_1, U_2, U_3 средств измерений, связанных со свойствами анализируемой смеси, сводится к их масштабированию и суммированию.

Относительная погрешность определения концентраций трех-четырёхкомпонентных смесей средствами измерений, реализующими многопараметрический метод, обычно составляет ± 3 —5%.

Метод различных свойств. Сущность данного метода состоит в том, что состав многокомпонентной смеси определяется путем совокупных измерений, базирующихся на прямых измерениях нескольких (в зависимости от числа компонентов) различных физико-химических свойств или параметров анализируемой многокомпонентной смеси. Системы уравнений в случае, если используемые для измерения свойства являются аддитивными, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= K_1 \Pi_{1\text{см}} = K_1 \sum_{l=1}^n \Pi_{1l} c_l, \\ &\text{LLLLLLLLLLLL} \\ U_i &= K_i \Pi_{i\text{см}} = K_i \sum_{l=1}^n \Pi_{il} c_l, \\ &\text{LLLLLLLLLLLL} \\ U_{(n-1)} &= K_{(n-1)} \Pi_{(n-1)\text{см}} = K_{(n-1)} \sum_{l=1}^n \Pi_{(n-1)l} c_l, 1 = \sum_{l=1}^n c_l, \end{aligned} \right\} \quad (12.6)$$

где $K_1, \dots, K_i, \dots, K_{(n-1)}$ — коэффициенты преобразования измерительных устройств, используемых для прямых измерений свойств анализируемой смеси; $\Pi_{1\text{см}}, \dots, \Pi_{2\text{см}}, \dots, \Pi_{(n-1)\text{см}}$ — различные свойства смеси, измеряемые средствами измерений; $\Pi_{1i}, \dots, \Pi_{ii}, \dots, \Pi_{(n-1)i}$ — свойства i -го компонента, соответствующие выбранным для анализа свойствам анализируемой смеси и определяемые предварительно из справочных данных или экспериментальным путем.

В частных случаях значения свойств некоторых компонентов при определенных условиях могут быть одинаковы {анализ при равных свойствах [26]}. Это позволяет несколько упростить измерительную систему. Например, если для анализируемой трехкомпонентной смеси условия анализа подобраны так, что для двух неопределяемых компонентов значения свойств равны, то анализ этой смеси может

быть сведен к анализу двухкомпонентной. Для реализации последнего достаточно провести одно измерение (см. гл. 11) вместо двух. В результате такого анализа получают информацию о концентрации определяемого и суммы неопределяемых компонентов.

Известны также применения метода различных свойств, когда значения свойств всех компонентов, кроме определяемого, равны нулю (*анализ при исчезающих свойствах* [26]). В этих случаях математическое описание анализа и выводы аналогичны приведенным в § 11.1.

Рассмотренный многопараметрический метод анализа состава многокомпонентной смеси находит применение чаще других многопараметрических методов.

Определенным эксплуатационным неудобством измерительных установок и систем, реализующих метод различных свойств, является необходимость использования в их составе различных по принципам действия и конструкциям анализаторов.

Метод различных условий. Сущность данного метода состоит в том, что состав многокомпонентной смеси определяется путем совокупных измерений, базирующихся на прямых измерениях одного и того же физико-химического свойства или параметра анализируемой смеси при нескольких (в зависимости от числа компонентов) условиях. Система уравнений в случае, если при всех принятых условиях выбранное свойство является аддитивным, имеет вид

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= K_1(\Pi_{\text{см}}) = K_1 \sum_{i=1}^n (\Pi_i)_1 c_i, \\ \text{LLLLLLLLLLLL} \\ U_i &= K_i(\Pi_{\text{см}}) = K_i \sum_{i=1}^n (\Pi_i)_i c_i, \\ \text{LLLLLLLLLLLL} \\ U_{(n-1)} &= K_{(n-1)}(\Pi_{\text{см}}) = K_{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Pi_i)_{(n-1)} c_i, 1 = \sum_{i=1}^n c_i, \end{aligned} \right\} \begin{matrix} (12. \\ 7) \end{matrix}$$

где $K_1, \dots, K_i, \dots, K_{(n-1)}$ — коэффициенты преобразования измерительных устройств, используемых для прямых измерений свойства анализируемой смеси при различных условиях; $(\Pi_{\text{см}})_1, \dots, (\Pi_{\text{см}})_i, \dots, (\Pi_{\text{см}})_{(n-1)}$ — одно и то же свойство анализируемой смеси при $(n-1)$ условиях измерения; $(\Pi_i)_i$ — свойство i -го компонента при i -м условии, аналогичное свойству анализируемой смеси при этом же условии измерений.

Определенным преимуществом данного многопараметрического метода анализа состава по сравнению с предыдущим является однородность используемых автоматических анализаторов, что упрощает эксплуатацию измерительной установки или системы.

В последние годы разработан ряд новых автоматических анали-

затворов состава, реализующих метод различных условий [34] и основанных на явлении диффузии. Отличительной особенностью этих анализаторов является простота создания различных условий и вытекающая из этого простота конструкции.

На рис. 12.2, а приведена схема автоматического анализатора состава трехкомпонентных газовых смесей (состав в данном случае представлен объемными концентрациями)

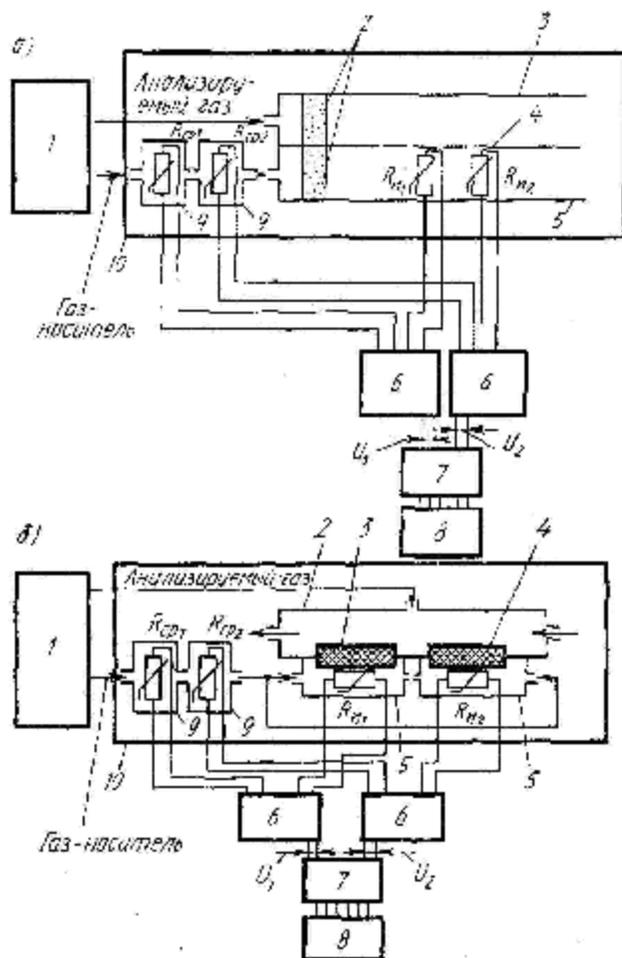


Рис. 12.2. Схемы автоматических анализаторов состава трехкомпонентных газовых смесей, основанных на процессах взаимной диффузии и проникания через мембрану

основанного на взаимной диффузии газовых потоков, протекающих непрерывно с постоянными и одинаковыми скоростями по каналам 3 и 5, имеющим прямоугольное сечение. В эти каналы с постоянными объемными расходами из блока питания 1 подаются потоки газа-носителя и

анализируемого газа. При этом последний предварительно разбавляется (в 3—5 раз) газом-носителем в постоянном соотношении, разбавление анализируемого газа необходимо для обеспечения независимой диффузии компонентов. Потoki попадают в каналы 2 и 5 через успокоители 2, изготовленные из пористого стекла. На участке, где каналы 3 и 5 отделены друг от друга перегородкой 4, представляющей собой тонкую металлическую сетку, служащую для исключения конвекции, происходит взаимная диффузия потоков. Компоненты анализируемой смеси диффундируют к измерительным терморезисторам $R_{и1}$ и $R_{и2}$ с различными скоростями, определяемыми их коэффициентами диффузии. Поэтому в процессе диффузии происходит частичное разделение компонентов анализируемой смеси. В результате изменения составов газовых смесей, омывающих терморезисторы $R_{и1}$ и $R_{и2}$, а следовательно, и теплопроводности, изменяется тепловой режим этих терморезисторов.

Терморезисторы $R_{и1}$ и $R_{и2}$ расположены вдоль канала 5 на одинаковом расстоянии от перегородки 4. При постоянных скоростях газовых потоков в каналах такое расположение терморезисторов обеспечивает различную продолжительность диффузии к ним компонентов анализируемой газовой смеси, т. е. различные условия измерений. Сравнительные терморезисторы $R_{и1}$ и $R_{и2}$ расположены в камерах 9 и всегда омываются газом-носителем. Возникающие сигналы неравновесных мостов 6 используются вычислительным устройством 7 для расчета концентраций компонентов анализируемой смеси. Регистрация сигналов вычислительного устройства осуществляется многоточечным потенциометром 8. Аналитическое устройство 10 термостатируется при температуре 45°C.

В автоматическом анализаторе состава трехкомпонентной смеси (рис. 12.2, б) используется явление проницания через мембраны 3 и 4, которые отделяют камеры 2 от камер 5. В последних расположены измерительные терморезисторы $R_{и1}$ и $R_{и2}$. Мембраны изготовлены из различных материалов, например фторопласта и резины, проницание газов через которые различно и зависит от природы компонента. Так, через фторопластовые мембраны проницаемость уменьшается с увеличением молекулярной массы углеводородов, а через резиновые — увеличивается. Это позволяет создавать различные условия измерения.

В процессе работы анализатора через камеру 2 непрерывно протекает анализируемый газ, а через камеры 5 — газ-носитель. Проницающие через мембраны 3 и 4 компоненты попадают в поток га-газа-носителя и изменяют за счет своей теплопроводности тепловой режим терморезисторов $R_{и1}$ и $R_{и2}$. В остальном работа автоматического анализатора аналогична предыдущему.

Использование в рассмотренных автоматических анализаторах Детекторов, селективно чувствительных к определенному классу веществ, позволяет определить концентрации этих веществ в многокомпонентных смесях с любым числом компонентов. Так, использование термохимических озонолизных детекторов позволяет непре-

ривно измерять концентрацию олефинов (этилена, пропилена и бутиленов) в газовых потоках базового процесса нефтехимии — пиролиза, а применение термохимических каталитических детекторов (см. § 11.11)—непрерывно измерять концентрацию водорода метана и оксида углерода в дымовых газах. Возможность варьирования продолжительности диффузии в анализаторах, основанных на взаимной диффузии, материалом мембран и расходом газаносителя, в анализаторах, основанных на проницаемости мембраны, позволяет во многих случаях свести анализ состава трехкомпонентной смеси к анализу двухкомпонентной. При этом определяется концентрация определяемого компонента и суммы неопределяемых.

Для сигнала неравновесного моста рассмотренных анализаторов запишем:

$$U = K_1 [(\Omega_1)_1 c_1 + (\Omega_2)_1 c_2 + (\Omega_3)_1 c_3], \quad (12.8)$$

где $(\Omega_1)_1$, $(\Omega_2)_1$, $(\Omega_3)_1$ — параметры, зависящие от коэффициентов диффузии (или проницаемости) компонентов и физико-химического свойства, к которому чувствителен детектор (для анализаторов, приведенных на рис. 12.2, это величина, обратная теплопроводности).

Если выбрать условие анализа так, чтобы выполнялось равенство

$$(\Omega_2)_1 = (\Omega_3)_1 = (\Omega_n)_1 \quad (12.9)$$

где $(\Omega_n)_1$ — параметр для неопределяемых компонентов, то вместо трех уравнений для определения концентрации определяемого компонента достаточно только двух:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= K_1 [(\Omega_1)_1 c_1 + (\Omega_n)_1 c_n] \\ 1 &= c_1 + c_n \end{aligned} \right\} \quad \begin{matrix} (12. \\ 10) \end{matrix}$$

где $c_n = c_2 + c_3$ — суммарная концентрация неопределяемых компонентов.

Решение системы уравнений (12.10) относительно концентрации c_1 определяемого компонента аналогично приведенному в гл. 11.

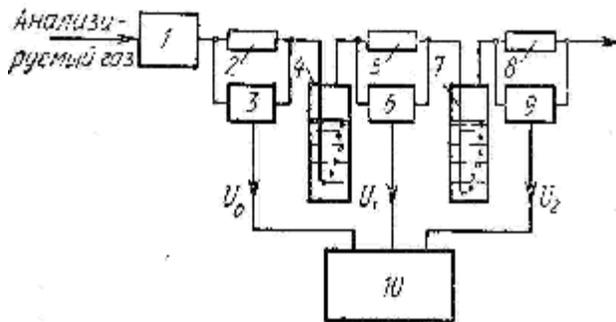
Если рассматривать параметр Ω как некоторое свойство анализируемой смеси, то можно данный случай анализа отнести к предыдущему многопараметрическому методу, реализуемому при равных значениях свойства некоторых компонентов.

Наряду с рассмотренным важным для практического применения анализаторов, представленных на рис. 12.2, является частный случай, при котором один из компонентов анализируемой смеси обладает существенно большим коэффициентом диффузии, чем остальные, и является определяемым компонентом (например, водород в газовых потоках процессов гидрирования, метан в природных и попутных нефтяных газах). В анализаторе, показанном на рис. 12.2, а, можно создать такую скорость газовых потоков, при которой в процессе взаимной диффузии к терморезистору будет успевать диффундировать только компонент с наибольшим коэффициентом

Решение системы уравнений (12.12) позволяет определить концентрации компонентов:

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= f_1(U_0, U_1), \\ c_2 &= f_2(U_1, U_2), \\ \text{LLLLLLLLLLLL} \\ c_i &= f_i(U_1, U_2, \dots, U_j, \dots, U_{(n-1)}), \\ \text{LLLLLLLLLLLL} \\ c_{(n-1)} &= f_{(n-1)}(U_{(n-1)}). \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} (12. \\ 13) \end{array}$$

Для наглядности рассмотрим реализацию анализа состава путем



последовательного поглощения на примере автоматического анализатора состава газовой смеси (рис. 12.3), в котором в качестве параметра прямого измерения используется объемный расход.

Анализируемый газ подается в анализатор через стабилизатор расхода из блока подготовки /. Поток этого газа проходит

Рис. 12.3. Схема автоматического анализатора состава трехкомпонентных газовых смесей, основанного на последовательном поглощении компонентов смеси

анализатора осуществляется в такой последовательности. В абсорберах 4 и 7 при барботаже происходит поглощение первого и второго компонентов анализируемой смеси. Пневмосопротивления 2, 5 и 8 с соответствующими дифференциальными манометрами 3, 6 и 9 представляют собой капиллярные расходомеры (см. гл. 7). Измерение перепада давлений на пневмосопротивлениях при близких значениях вязкости компонентов анализируемой смеси позволяет с помощью этих устройств измерять расходы газового потока до и после поглощения компонентов.

Сигналы капиллярных расходомеров

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= K_0 Q = K_0(Q_1 + Q_2 + Q_3), \\ U_1 &= K_1(Q - Q_1) = K_1(Q_2 + Q_3), \\ U_2 &= K_2(Q - Q_1 - Q_2) = K_3 Q_3, \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} (12. \\ 14) \end{array}$$

где K_0, K_1, K_2 — коэффициенты преобразования капиллярных расходомеров; Q — общий объемный расход анализируемого газа; Q_1, Q_2, Q_3 — парциальные объемные расходы компонентов.

Учитывая, что

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \text{ и } c_1 = Q_1/Q; \quad c_2 = Q_2/Q; \quad c_3 = Q_3/Q;$$

систему уравнений (12.14) можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= j_0(c_1 + c_2 + c_3) \\ U_1 &= j_1(c_2 + c_3), \\ U_2 &= j_2(c_3), \end{aligned} \right\} \quad \begin{array}{l} (1 \\ 2.15) \end{array}$$

где

$$\varphi_0 = K_0 Q; \quad \varphi_1 = K_1 Q; \quad \varphi_2 = K_2 Q.$$

Из решения системы находим

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= U_0/j_0 - U_1/j_1, \\ c_2 &= U_1/j_1 - U_2/j_2, \\ c_3 &= U_2/j_2. \end{aligned} \right\} \quad \begin{array}{l} (1 \\ 2.16) \end{array}$$

Если коэффициенты преобразования всех капиллярных расходомеров одинаковы, то $\varphi_0 = \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ и выражение (12.16) упрощается:

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= (1/j)(U_0 - U_1), \\ c_2 &= (1/j)(U_1 - U_2), \\ c_3 &= (1/j)U_2. \end{aligned} \right\} \quad \begin{array}{l} (1 \\ 2.17) \end{array}$$

Рассматриваемый автоматический анализатор может быть как электрическим, так и пневматическим, что определяется типом используемых дифференциальных манометров и вычислительного устройства 10.

Если вязкости компонентов анализируемой газовой смеси различны, может существенно увеличиться погрешность анализа, что связано с изменениями коэффициентов преобразования капиллярных расходомеров, вызванными изменениями состава смеси. Для смесей углеводородных газов существенного уменьшения погрешности измерения можно добиться использованием подключения параллельно капиллярам (ламинарные пневмосопротивления) равных по проводимости диафрагм (турбулентные пневмосопротивления).

§ 12.3. Хроматографические методы и средства автоматического анализа состава

Хроматография (от греч. *chroma (chromatos)* — цвет и *grapho* — пишу, т. е. «запись цвета» или «цветопись») — физический метод разделения многокомпонентных смесей, при котором компоненты смеси в процессе разделения распределяются между двумя фазами, одной из которых является неподвижный слой с большой поверхностью, а другой — поток, фильтрующийся через неподвижный слой. Разделение компонентов при этом происходит за счет различия их скоростей движения через неподвижный слой, связанного с различной сорбируемостью компонентов этим слоем.

В настоящее время хроматография является наиболее универсальным методом разделения многокомпонентных смесей веществ самой различной природы (металлов, жидкостей, газов, биологических сред и т. д.). Как метод разделения хроматография находит применение в технологических процессах. Наиболее успешное ее применение связано с задачами анализа состава многокомпонентных смесей.

Явление хроматографического разделения многокомпонентных смесей было открыто в 1903 г. русским ученым-ботаником М. С. Цветом при исследованиях состава хлорофилла. Он обнаружил возможность отделения с помощью адсорбентов зеленой части хлорофилловых пигментов листьев (хлорофиллинов) от желтой (ксантофиллинов). Образовавшиеся в опытах М. С. Цвета в пробирке полосы, окрашенные в различные цвета, послужили основанием для введения термина «хроматография», который как бы ограничивает возможности использования этого метода для исследований окрашенных веществ. Однако М. С. Цвет высказал предположение, что хроматографический метод применим и для бесцветных веществ. Он же разработал несколько вариантов хроматографического разделения.

Важность работ М. С. Цвета не была осознана, она была предана забвению, и лишь в 30-е годы начался новый период развития хроматографии, характеризующийся созданием разнообразной аппаратуры для технологического и особенно аналитического применения и проникновением хроматографии во все новые области науки и техники. Трудно сейчас назвать отрасль науки и техники, где не использовалась бы хроматография. Одним из наиболее перспективных является применение хроматографии для контроля и управления химико-технологическими процессами нефтехимической, химической, пищевой, нефтеперерабатывающей, газоперерабатывающей и других отраслей промышленности.

В настоящее время разработано большое число хроматографических методов разделения. Их реализация осуществляется путем применения различных явлений для разделения компонентов (адсорбция, растворение в нелетучих жидкостях, образование нерастворимых соединений за счет химических реакций и т. д.), использование различного агрегатного состояния подвижной и неподвижной фаз и разнообразных способов подачи анализируемой смеси в неподвижную и подвижную фазы.

Для автоматического анализа состава непосредственно на потоках химико-технологических процессов в настоящее время применяются хроматографические анализаторы, реализующие так называемый проявительный (элюентный) колоночный метод хроматографического анализа [27]. Сущность хроматографического метода разделения многокомпонентных смесей состоит в следующем: через колонку 1 (рис. 12.4, а), наполненную неподвижной фазой 2, непрерывно прокачивается подвижная фаза 3, которую называют веществом-носителем или элюентом.

Неподвижной фазой служит порошкообразный адсорбент или твердый носитель, покрытый жидкостью. В качестве подвижной фазы используются различные газы (газы-носители) или жидкости (жидкости-носители).

В зависимости от типа неподвижной фазы и агрегатного состояния подвижной фазы различают следующие разновидности хроматографического проявительного анализа:

газо-адсорбционный (подвижная фаза — газ, неподвижная фаза — адсорбент);

газо-жидкостный (подвижная фаза — газ, неподвижная фаза — твердый адсорбент, покрытый жидкостью);

жидкостно - адсорбционный (подвижная фаза — жидкость, неподвижная фаза — адсорбент);

жидкостно - жидкостный (подвижная фаза — жидкость, неподвижная фаза — твердый носитель, покрытый жидкостью).

Когда подвижной фазой служит газ, разделяемая смесь вводится в колонку в газообразном состоянии, а когда подвижной фазой служит жидкость — в жидком состоянии.

Последовательность разделения многокомпонентной смеси при проявительном хроматографическом анализе можно проследить по рис. 12.4, б—д на примере разделения смеси из трех компонентов *A*, *B* и *C*. Проба этой смеси вводится в колонку (рис. 12.4, б), через которую непрерывно прокачивается подвижная фаза (для упрощения изображения на рис. 12.4, б—д неподвижная фаза, заполняющая колонку, не показана). В колонке вследствие взаимодействия неподвижной фазы с молекулами компонентов *A*, *B* и *C* последние приобретают различные скорости движения, меньшие, чем скорость движения подвижной фазы.

Взаимодействие компонентов с неподвижной фазой выражается в многократном повторении процессов сорбции (адсорбции или абсорбции) молекул указанных компонентов неподвижной фазой и их десорбции потоком подвижной фазы. Если компоненты обладают различной сорбируемостью в неподвижной фазе, что определяет различие в скоростях их движения, то по мере продвижения по колонке они будут постепенно разделяться. Так, на рис. 12.4, в показано типичное разделение компонентов *A*, *B* и *C*, а на рис. 12.4, г видно, что при частичном разделении компонентов *B* и *C* произо-

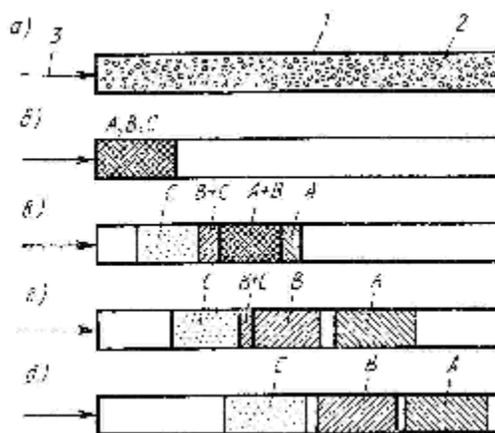


Рис. 12.4. Схема разделения трехкомпонентной смеси в хроматографическом проявительном анализе

шло полное отделение компонента A . При соответствующем выборе длины колонки, типа неподвижной и подвижной фаз можно добиться полного разделения компонентов A , B и C (рис. 12.4, d). Таким образом, при проявительном хроматографическом анализе в колонке образуются зоны бинарных смесей компонента с подвижной фазой, разделенные зонами чистой подвижной фазы. При дальнейшем перемещении образовавшихся полос подвижной фазой эти полосы последовательно выводятся из колонки.

Для явлений адсорбции (взаимодействие электрического поля твердого вещества с молекулами жидкостей и газов) и абсорбции (растворение молекул газов и жидкостей в жидкости-сорбенте) характерно то, что с увеличением молекулярной массы в пределах гомологических рядов сорбируемость веществ увеличивается. Поэтому при проявительном хроматографическом анализе во времени из колонки компоненты будут выходить в порядке возрастания молекулярных масс.

Скорость движения i -го компонента W_i по колонке описывается в первом приближении выражением

$$W_i = R_i W_{в-н} \quad (12.18)$$

где R_i — коэффициент удерживания, определяемый как доля от общего количества i -го компонента, находящаяся в подвижной фазе; $W_{в-н}$ — скорость вещества-носителя.

Коэффициент R_i зависит от природы компонента, неподвижной и подвижной фаз, молекулярной массы компонента, температуры и давления колонки. Он характеризует сорбируемость компонента на данной неподвижной фазе.

Время движения компонента по хроматографической колонке принято называть временем удерживания. Приближенное время удерживания некоторого i -го компонента

$$\tau_i = L/W_i \quad (12.19)$$

где L — длина хроматографической колонки.

При движении компонентов разделяемой смеси по хроматографической колонке одновременно с процессом его разделения происходит диффузия молекул компонентов. Она протекает как в подвижной фазе, так и на поверхности неподвижной фазы. Это явление вызывает размывание полос отдельных компонентов. Причем на выходе колонки концентрация молекул каждого из компонентов в подвижной фазе обычно оказывается распределенной по закону, близкому к нормальному (см. рис. 1.8, a).

В хроматографических анализаторах в общем случае процесс разделения многокомпонентной смеси сочетается с каким-либо процессом измерения количества разделенных компонентов.

Таким образом, принцип действия хроматографических автоматических анализаторов состоит в разделении пробы многокомпонентной анализируемой смеси проявительным хроматографическим методом и в непрерывном измерении какого-либо физико-химиче-

ского свойства потока, выходящего из хроматографической колонки.

Измерение физико-химического свойства потока, вытекающего из хроматографической колонки, позволяет, как будет показано, определять количества отдельных компонентов и их концентрации в многокомпонентной анализируемой смеси.

В зависимости от агрегатного состояния подвижной фазы *хроматографические анализаторы* (хроматографы) разделяют на *газовые* (подвижная фаза — газ) и *жидкостные* (подвижная фаза — жидкость).

Автоматические газовые хроматографические анализаторы. На рис. 12.5 показана функциональная схема автоматического газового хроматографа, который способен осуществлять анализ газообразных и жидких многокомпонентных смесей путем разделения их газо-адсорбционным или газожидкостным хроматографическим проявительным методом (см. выше). Основными блоками автоматического газового хроматографа являются: блок подготовки газов и анализируемого вещества 1, аналитическое устройство 5, масштабирующий измерительный преобразователь 8 сигнала детектора, устройство обработки измерительной информации 9, самопишущий прибор 10 и устройство управления 12.

Блок подготовки 1 содержит узел очистки и стабилизации параметров (обычно давления и расхода) газа-носителя 2, аналогичные узлы для анализируемого вещества 3 и вспомогательного газа (газов) 4.

В аналитическом устройстве 5, температура которого автоматически стабилизируется, размещаются дозатор газа или жидкости 14, испаритель 15, хроматографическая колонка 6, дифференциальный детектор 7 (детектором в хроматографе называют первичный преобразователь, на который воздействует физико-химическое свойство потока газов), змеевики 13 для стабилизации температуры потоков газа-носителя, трубка 11, вместо которой иногда используется сравнительная (или дополнительная) хроматографическая колонка.

Управляющее устройство 12 осуществляет согласование во времени работы всех блоков хроматографа (на упрощенном рис. 12.5

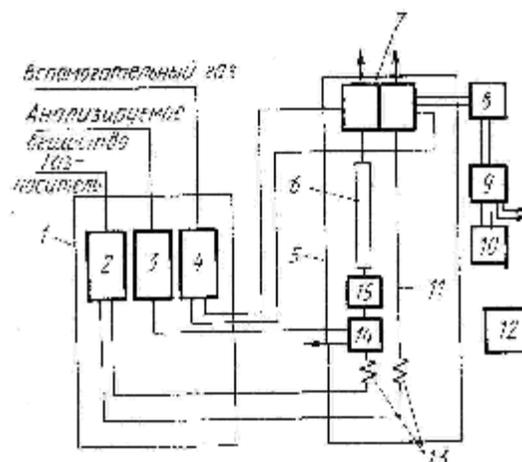


Рис. 12.5. Схема автоматического газового хроматографического анализатора

связи этого устройства с остальными блоками хроматографа не показаны), а также автоматическое регулирование температуры аналитического устройства.

Блок подготовки и аналитическое устройство располагаются обычно около точки отбора анализируемого вещества, а остальные блоки размещаются в операторной. Автоматический газовый хроматографический анализатор является устройством циклического действия и имеет два режима работы «Подготовка» и «Анализ».

В обоих режимах к аналитическому устройству из блока подготовки непрерывно подводятся газ-носитель, анализируемое вещество и вспомогательный газ (этот газ бывает необходим для обеспечения работы некоторых типов детекторов. В режиме «Подготовка» через дозатор 14, испаритель 15 и хроматографическую колонку 6 и трубку 11 прокачивается газ-носитель. При этом дозатор 14 по сигналу устройства управления 12 переключен в режим отбора пробы анализируемого вещества. Режим «Подготовка» обычно длится 1—2 мин, затем по сигналу устройства управления 12 дозатор 14 переключается в положение, соответствующее режиму работы хроматографа «Анализ». При этом переключении происходит отбор пробы анализируемого вещества. Отобранная проба, всегда постоянная по объему, транспортируется газом-носителем к хроматографической колонке 6. Если анализируемое вещество является жидким, то оно испаряется в испарителе 15, а затем поступает в хроматографическую колонку, где происходит разделение анализируемого многокомпонентного вещества на компоненты, которые поочередно потоком газа-носителя вымываются из колонки и транспортируются в измерительную камеру дифференциального детектора. В сравнительную камеру этого детектора все время поступает поток газа-носителя по трубке 11. Детектор непрерывно измеряет какое-либо физико-химическое свойство потока. При протекании через измерительную и сравнительную камеры детектора газа-носителя на выходе его формируется (рис. 12.6, а) некоторое начальное значение сигнала U_0 (с помощью корректирующих устройств это значение автоматически устанавливается равным нулю). При поступлении в измерительную камеру детектора компонента, имеющего физико-химическое свойство, отличное от физико-химического свойства газа-носителя, сигнал детектора изменяется в зависимости от концентрации этого компонента в газе-носителе и его физико-химического свойства (рис. 12.6, а). В каждый момент времени изменение сигнала $\Delta U_i(\tau)$ любого дифференциального детектора описывается выражением [22]:

$$\Delta U_i(\tau) = U_i(\tau) - U_0 = k_{\text{п}}(P_i - P_{\text{г-н}})\alpha_i(\tau) \quad (12.20)$$

где $U_i(\tau)$ — текущее значение сигнала детектора; $k_{\text{п}}$ — коэффициент преобразования детектора по физико-химическому свойству; P_i и $P_{\text{г-н}}$ — физико-химическое свойство или комбинация свойств i -го компонента и газа-носителя, к которому чувствителен детектор.

Изменение сигнала детектора во времени при выходе из хроматографической колонки каждого из компонентов имеет форму пика, близкую к форме кривой нормального распределения.

Последовательность сигналов детектора на 1, 2, ..., i, ..., n компоненты образует так называемую *хроматограмму* (рис. 12.6, а), которая обычно регистрируется на диаграммной ленте самопишущего прибора.

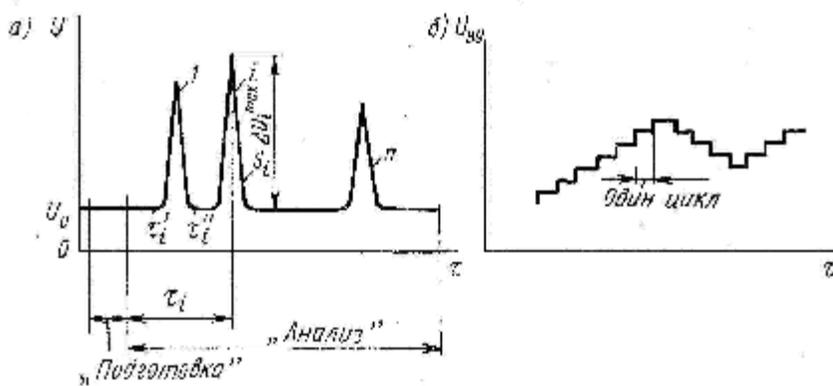


Рис. 12.6. Хроматограмма (а) и выходной сигнал автоматического хроматографического анализатора

Каждому компоненту при постоянных условиях работы анализатора (постоянный расход и давление газа-носителя, температура аналитического устройства и др.) соответствует вполне определенное время удерживания τ_i значение которого предварительно определяется при настройке автоматического хроматографического анализатора.

Для определения концентрации любого компонента в анализируемой смеси используется информация о максимальном изменении ΔU_i^{\max} значения сигнала (высота пика) или площади сигнала S_i этого компонента (рис. 12.6, а), которые, как будет показано ниже, однозначно определяются концентрацией компонентов в анализируемой многокомпонентной смеси. Сигнал детектора поступает на вход измерительного преобразователя 8, который формирует на своем выходе унифицированный сигнал (электрический или пневматический), пропорциональный сигналу детектора. Вычислительное устройство 9 осуществляет определение высоты ΔU_i^{\max} или площади S_i пика (в зависимости от конструкции устройства) и запоминает определенные значения на один цикл работы хроматографического анализатора. Поэтому выходной сигнал $U_{\text{вы}}$ вычислительного устройства изменяется ступенчато (рис. 12.6, б). Этот сигнал поступает на выход анализатора и регистрируется в виде ступенчатой кривой (для одного из компонентов) самопишущим прибором 10.

После того как хроматографическую колонку покинет последний из компонентов анализируемой смеси, цикл работы хроматографического анализатора заканчивается. По сигналам устройства управления 12 он опять переводится в режим работы «Подготовка». В последующих циклах все рассмотренные операции повторяются.

В зависимости от назначения автоматического хроматографического анализатора в нем могут использоваться различные по конструкции колонки, дозаторы и детекторы.

Колонки. Наиболее распространенные конструкции хроматографических колонок показаны на рис. 12.7. Они бывают прямыми (рис. 12.7, а), U-образными (рис. 12.7, б), U-образными, специальными (рис. 12.7, в) и спиральными (рис. 12.7, г). Колонки представляют собой трубки из нержавеющей стали, меди или стекла внутренним диаметром 2—6 мм и длиной 0,5—20 м. Форму колонок выбирают из конструктивных соображений компактности, удобства монтажа или замены и т. д.

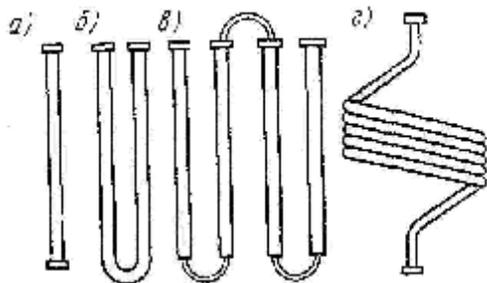


Рис. 12.7. Конструкции хроматографических колонок

В качестве неподвижной фазы в хроматографических колонках газовых хроматографов используются адсорбенты: активированный уголь, молекулярные сита (искусственные цеолиты), силика-гель (оксид кремния), алюмогель (оксид алюминия) и ряд других, или абсорбенты — высококипящие углеводороды (специальные жидкости), нанесенные на поверхность малоактивного адсорбента (носителя). Адсорбенты или носители имеют форму гранул со средним диаметром 0,1—0,5 мм.

Дозаторы. В современных промышленных автоматических хроматографах находят применение в основном дозаторы золотникового типа (рис. 12.8). Такие дозаторы состоят из неподвижных металлических пластин 3 и 5 и подвижной пластины (золотника) 4, изготовленной из специального материала (фторопласта, смеси фторопласта с ситаллом, смеси фторопласта с углеродом и др.). Перемещение подвижной пластины 4 осуществляется с помощью мембранного привода 1, соединенного с подвижной пластиной штоком 2. Мембранный привод управляется пневматическими сигналами P_1 и P_2 . Последние поступают от электропневматических преобразователей, которые в свою очередь получают электрические сигналы от устройства управления 12 (см. рис. 12.5). С помощью привода пластине 4 придается два возможных положения в зависимости от значений давлений P_1 и P_2 . На рис. 12.8 подвижные пластины дозаторов находятся в крайнем правом положении. В этом положении дозируемый объем анализируемого вещества потоком

газа-носителя выдавливается в колонку. Такое состояние дозатора соответствует режиму работы хроматографа «Анализ». В крайнем левом положении пластины 4 дозируемый анализируемый объем б промывается: потоком анализируемого вещества. Такое состояние дозатора соответствует режиму работы хроматографа «Подготовка». Дозатор, представленный на рис. 12.8, а, применяется обычно для дозирования жидких анализируемых веществ, дозатор, представленный на рис. 12.8, в — для дозирования газообразных веществ. Последний снабжается съемным дозируемым объемом б, что позволяет изменять объем пробы анализируемого вещества. Дозатор, представленный на рис. 12.8, б, может использоваться для дозирования жидкостей и малых объемов газов. Рассмотренный дозатор обеспечивает дозирование объемов от 10^{-3} до 10 см^3 .

Детекторы. В качестве детекторов газовых хроматографов могут быть в принципе использованы чувствительные элементы или первичные измерительные преобразователи практически всех анализаторов физико-химических свойств и концентраций газов, рассмотренных в гл. 10 и 11. При использовании их в хроматографе анализируемым газом служит газовый поток, выходящий из хроматографической колонки.

В современных автоматических хроматографических анализаторах для химико-технологических процессов используются следующие детекторы: термокондуктометрический (см. рис. 11.1), пламенный ионизационный (см. рис. 11.25, а), ионизационный аргоновый (см. рис. 11.10, а). При анализе полного состава многокомпонентных смесей находят применение так называемые равночувствительные детекторы [22].

Интерпретация информации. Результатом хроматографического анализа является хроматограмма (см. рис. 12.6), по которой в зависимости от решаемой задачи определяют либо концентрации всех

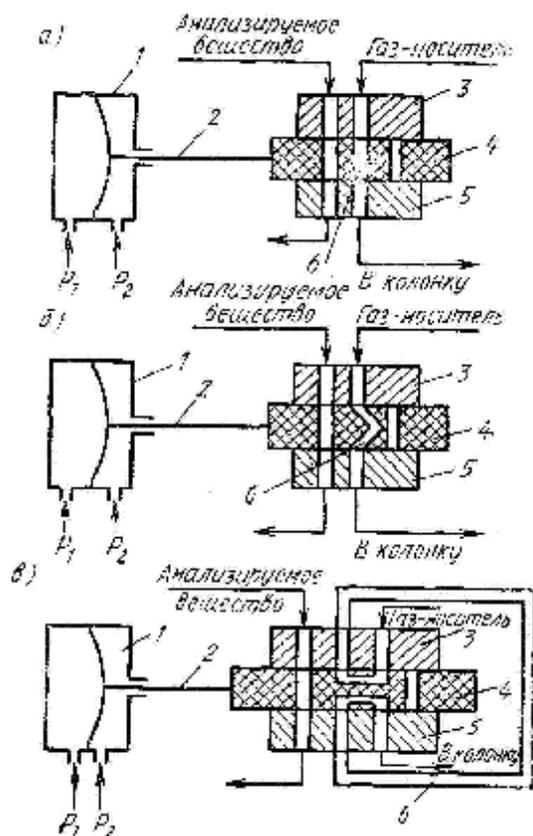


Рис. 12.8. Конструкция автоматических дозаторов хроматографических анализаторов

компонентов смеси, либо концентрацию одного или нескольких ключевых компонентов.

Определение концентрации ключевых компонентов осуществляют по высоте или площади пиков исходя из следующих положений. В соответствии с моделью сигнала (12.20) дифференциального детектора для высоты ΔU_i^{\max} и площади S_i пика i -го компонента имеем:

$$\Delta U_i^{\max} = k_{\Pi}(\Pi_i - \Pi_{\Gamma-H})\alpha_i^{\max}, \quad (12.21)$$

$$S_i = \int_{t_i'}^{t_i''} \Delta U_i(t) dt = k_{\Pi}(\Pi_i - \Pi_{\Gamma-H}) \int_{t_i'}^{t_i''} a_i(t) dt, \quad (12.22)$$

где α_i^{\max} — максимальное значение концентрации i -го компонента в его полосе, выходящей из хроматографической колонки; τ_i' и τ_i'' — моменты времени, соответствующие началу и окончанию выхода полосы i -го компонента из хроматографической колонки (см. рис. 12.6, а). При постоянных условиях работы анализатора интеграл

$\int_{t_i'}^{t_i''} a_i(t) dt$ однозначно связан с объемом V_i в паровой фазе i -го компонента,

проходящего через детектор:

$$\int_{t_i'}^{t_i''} a_i(t) dt = a_v V_i, \quad (12.23)$$

где a_v — постоянный коэффициент, обратно пропорциональный объемному расходу газа-носителя.

Величины α_i^{\max} и V_i при постоянном значении вводимой на анализ пробы анализируемого вещества однозначно связаны с концентрацией i -го компонента в

анализируемой многокомпонентной смеси:

$$\alpha_i^{\max} = k_{\alpha} c_i \quad (12.24)$$

$$V_i = k_v c_i \quad (12.25)$$

где k_{α} и k_v — постоянные коэффициенты; c_i — объемная концентрация i -го компонента в анализируемой смеси, определенная в газовой фазе.

Используя выражения (12.21), (12.24) и (12.22), (12.23) и (12.25), находим

$$\Delta U_i^{\max} = k_U c_i \quad (12.26)$$

$$S_i = k_S c_i \quad (12.27)$$

где $k_U = k_{\Pi} k_{\alpha} (\Pi_i - \Pi_{\Gamma-H})$; $k_S = k_{\Pi} a_v k_v (\Pi_i - \Pi_{\Gamma-H})$ — постоянные для i -го

компонента при выбранных условиях работы анализатора коэффициенты. Для каждого компонента в общем случае коэффициенты k_U и k_S определяются при градуировке хроматографического анализатора.

Рассмотренная интерпретация информации . применяется при анализе газовых смесей.

При измерении газовым автоматическим хроматографом концентрации одного или нескольких ключевых компонентов в жидком анализируемом веществе из-за изменения плотности последнего размерность концентраций для удобства эксплуатации и градуировки целесообразно иметь следующей:

$$\left[\frac{\text{ед. массы определяемого компонента}}{\text{ед. объема анализируемой смеси}} \right]$$

Только при такой размерности концентрации коэффициенты в выражениях (12.26) и (12.27) будут постоянны.

Интерпретация информации при анализе полного состава многокомпонентной смеси обычно осуществляется по площадям пиков и базируется на использовании закона Амага:

$$V_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n V_i, \quad (12.28)$$

где $V_{\text{см}}$ — объем смеси газов или паров (в данном случае это объем пробы анализируемого вещества в газообразном состоянии при некоторых постоянных условиях, например при нормальных).

Объемная концентрация в газовой фазе любого компонента

$$c_i = V_i / V_{\text{см}} = V_i / \sum_{i=1}^n V_i. \quad (12.29)$$

Используя выражения (12.22), (12.23) и (12.29), получим

$$c_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{k_{\Pi} (\Pi_i - \Pi_{\Gamma-\text{H}}) a_v S_i}{k_{\Pi} (\Pi_i - \Pi_{\Gamma-\text{H}}) a_v S_i}}. \quad (12.30)$$

В практике выражению (12.30) придают вид

$$c_i = \frac{k_i S_i}{\sum_{i=1}^n k_i S_i}, \quad (12.31)$$

где k_i — коэффициент относительной чувствительности детектора к i -му компоненту (поправочный коэффициент), учитывающий инди-

видуальное значение физико-химического свойства P_i этого компонента.

Коэффициенты k_i предварительно определяют расчетным или экспериментальным путем, что является сложной и трудоемкой процедурой. Поэтому при анализе полного состава газовых смесей в промышленных хроматографах целесообразно применять равночувствительные детекторы. Для этих детекторов все коэффициенты k_i одинаковы и равны 1. Использование равночувствительных детекторов, которыми могут служить устройства, показанные на рис. 11.2, а; 11.3 [22], позволяет исключить указанные трудоемкие операции, а расчет концентраций осуществлять по формуле

$$c_i = S_i / \sum_{i=1}^n S_i . \quad (12.32)$$

Значения концентраций c_i могут быть определены по формулам (12.31) и (12.32) как при анализе состава газовых, так и жидких смесей. Причем при известных значениях плотностей паров компонентов жидкой смеси концентрации могут быть пересчитаны в массовые:

$$c_{mi} = r_i c_i / \sum_{i=1}^n r_i c_i , \quad (12.33)$$

где r_i — плотность паров i -го компонента в нормальных условиях.

В настоящее время газовые хроматографы являются наиболее распространенным средством автоматического анализа состава газообразных и жидких многокомпонентных смесей. Время одного цикла работы хроматографа составляет от нескольких минут до одного часа и зависит от решаемой задачи. Относительная погрешность измерения концентрации каждого из компонентов составляет $\pm(2—5)$ %. Диапазон измерений концентрации от $10^{-5}—10^{-2}$ до 100% (в зависимости от типа детектора). Температура аналитического устройства может стабилизироваться в диапазоне $40—300^\circ\text{C}$.

Автоматические жидкостные хроматографические анализаторы. Эти средства аналитической техники только начинают внедряться в практику автоматического контроля состава жидких сред на химико-технологических процессах.

Использование жидкостной хроматографии для анализа состава жидких многокомпонентных веществ имеет ряд преимуществ по сравнению с газовой при решении аналитических задач. Наиболее важные из них — отсутствие необходимости нагревания основных узлов хроматографа до высоких температур с целью предотвращения конденсации паров анализируемой жидкости; отсутствие деструкции высокомолекулярных жидких веществ; во многих случаях большая скорость анализа и эффективность разделения.

Схема автоматического жидкостного хроматографического анализатора показана на рис. 12.9. Функции основных блоков и узлов

жидкостного хроматографа аналогичны функциям соответствующих блоков и узлов газового хроматографа (см. рис. 12.5). Отличие состоит в том, что в жидкостном хроматографе отсутствует испаритель жидкой пробы, а блок подготовки 1 анализируемого вещества и жидкости-носителя содержит: резервуар 2 для жидкости-носителя, насос 3 для подачи жидкости-носителя и узел 4 стабилизации параметров анализируемого вещества.

Последовательность работы жидкостного хроматографа идентична последовательности работы газового хроматографа. Аналогична работа всех остальных блоков и элементов, которые, начиная с поз. 5, имеют такую же нумерацию, как и на рис. 12.5.

В этих хроматографах обычно используются дозаторы золотникового типа и прямые колонки длиной до 1 м, заполненные сорбентом со средним диаметром фракций 5—50 мкм. В качестве детекторов в жидкостных хроматографах чаще других используют детекторы, основанные на поглощении электромагнитного излучения в ультрафиолетовой области

(185—2500 нм) и рефрактометрические детекторы. По принципу действия они аналогичны ультрафиолетовым адсорбционным анализаторам (см. гл. 11) и рефрактометрам (см. гл. 10). Отличие детекторов от названных анализаторов состоит в том, что кюветы детекторов имеют обычно меньший объем, который не превышает 10^{-2} см^3 .

В некоторых случаях в жидкостных хроматографах используются кондуктометрические, диэлькометрические детекторы, детекторы теплоты сорбции. Принципы действия этих устройств аналогичны принципам работы соответствующих анализаторов (см. гл. 11).

Важной частью жидкостных хроматографов является узел подачи жидкости-носителя (растворителя). Ввиду того что колонки жидкостных хроматографов для увеличения эффективности разделения и скорости анализа заполняются очень мелкой фракцией сорбента, для прокачки жидкости-носителя через колонку необходимо создавать высокое давление 10—30 МПа ($100\text{—}300 \text{ кгс/см}^2$). Для этого используются миниатюрные плунжерные, диафрагменные, ротационные и другие насосы. Для сглаживания пульсаций, возникающих при подаче жидкости-носителя насосом, применяют поршневые или

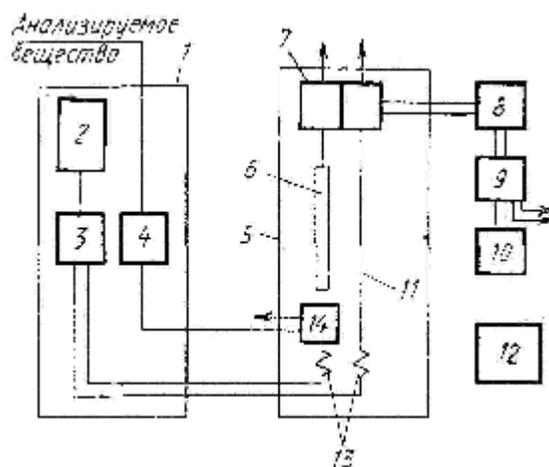


Рис. 12.9. Схема автоматического жидкостного хроматографического анализатора

гидродинамические демпферы, по принципу действия аналогичные применяемым для промышленных насосов.

Метрологические характеристики жидкостных хроматографических анализаторов близки к приведенным выше характеристикам газовых хроматографов.

Устройства обработки измерительной информации для хроматографических анализаторов. При использовании автоматического

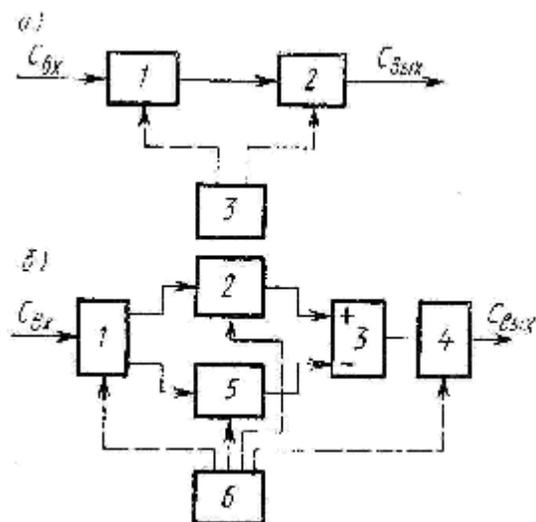


Рис. 12.10. Структурные схемы аналоговых вычислительных устройств для автоматических хроматографических анализаторов

концентрации компонента в анализируемой смеси. Названные вычислительные устройства реализуются на аналоговых элементах электронной техники или пневмоавтоматики. При этом как электронные, так и пневматические вычислительные устройства строятся по одним и тем же принципиальным схемам (рис. 12.10). В автоматических хроматографических анализаторах (см. рис. 12.5 и 12.9) сигнал детектора измерительным преобразователем 8 преобразуется в унифицированный электрический или пневматический сигнал (в случае преобразования в пневматический сигнал дополнительно используется электропневматический преобразователь). Этот сигнал $C_{вх}$ является входным для аналогового вычислительного устройства.

Когда начальный уровень выходного сигнала U_0 (см. рис. 12.6, а) детектора остается постоянным от цикла к циклу или в хроматографе предусмотрено устройство корректировки этого уровня, для обработки информации применяется вычислительное устройство, схема которого показана на рис. 12.10, а. Оно содержит устройство 1 запоминания максимального значения сигнала $C_{вх}$ и устройство 2 запоминания аналогового сигнала, работа которых во времени согласуется командами, поступающими от устройства управления 3 хроматографического анализатора. Начальный уровень сигнала $C_{вх0}$, пропорциональный U_0 , принимается для вычислитель-

ного устройства за условный нуль или устанавливается с помощью корректора равным нулю. В пределах одного цикла работы хроматографа в вычислительном устройстве осуществляются следующие операции. По команде устройства 3 в устройстве 1 перед началом выхода ключевого компонента стирается информация, оставшаяся от предыдущего цикла работы анализатора. При выходе ключевого компонента устройство 1 запоминает максимальное значение сигнала детектора (высоту пика) в момент времени, когда знак первой производной сигнала $C_{вх}$ изменяется с «+» на «—». Такие операции выполняются устройствами, называемыми пиковыми детекторами. Они представляют собой диоды (или соединения элементов, заменяющих диод), обладающие большим отношением обратного и прямого сопротивлений. Затем по команде устройства 3 запомненное значение максимального сигнала переписывается в устройство 2, где и сохраняется на один цикл работы хроматографического анализатора. Сформированный на выходе вычислительного устройства аналоговый электрический или пневматический сигнал $C_{вык}$ изменяется во времени так, как показано на рис. 12.6, б.

В вычислительном устройстве, приведенном на рис. 12.10, б, используется более сложная схема. Однако оно позволяет учитывать возможные изменения начального уровня сигнала $C_{вх}$ детектора, что обеспечивает большую точность хроматографического анализа. В данном устройстве в пределах одного цикла работы хроматографического анализатора осуществляются следующие операции. По команде устройства управления 6 хроматографического анализатора перед началом выхода ключевого компонента в устройстве запоминания максимума 2 стирается информация, оставшаяся от предыдущего цикла работы анализатора. С помощью коммутатора 1 на вход устройства 5 запоминания начального уровня сигнала детектора посылается сигнал $C_{вх0}$. Начальное значение сигнала в момент времени τ_i' (см. рис. 12.6, а) запоминается устройством 5. Затем с помощью коммутатора 1 сигнал $C_{вх}$ посылается на вход устройства 2. При выходе ключевого компонента устройство 2 запоминает максимальное значение сигнала детектора. Сигналы с выходов устройств 2 и 5 поступают в сумматор 3, где вычисляется их разность. Затем по команде устройства управления 6 эта разность, определяющая высоту пика ΔU_i^{\max} , переписывается в устройство запоминания аналогового сигнала 4, где и сохраняется на один цикл работы хроматографического анализатора. Основная приведенная погрешность рассмотренных вычислительных устройств составляет $\pm(0,5-1)\%$.

ГЛАВА 13

ИЗМЕРЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА НЕФТЕЙ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

§ 13.1. Современная концепция оценки качества нефтей и нефтепродуктов

Процессы переработки нефти, газа и газового конденсата являются наиболее многотоннажными современными химико-технологическими процессами. Так, мощность современных установок первичной переработки нефти составляет 6—12 млн. т. в год. Просчеты при управлении такими процессами недопустимы. Это определяет жесткие требования к контролю качества потоков в нефтегазоперерабатывающей и нефтехимической промышленности.

Характерной особенностью сырья, промежуточных и конечных продуктов указанных отраслей является то, что они представляют собой многокомпонентные смеси углеводородов и других соединений, содержащие сотни и десятки сотен компонентов. Качество таких смесей в настоящее время оценивается комплексами характеристик, в которые входят физико-химические свойства (плотность, вязкость, молекулярная масса, упругость насыщенных паров и др.), содержание отдельных примесей, иногда компонентный состав, а также ряд показателей качества (см. гл. 9), определяющих пригодность названных смесей к переработке или потреблению. К таким показателям относится фракционный состав, выкипаемость при характерной температуре, октановое число бензинов, цитановое число дизельных топлив, радирующая способность реактивных и ракетных топлив, температура вспышки и др. Указанные комплексы характеристик используются при полной лабораторной оценке качества нефтей, нефтепродуктов и газового конденсата. Для управления технологическими процессами обычно используют измерительную информацию об одной или двух характеристиках, входящих в комплекс, значение которых для конкретного процесса наиболее существенно.

Для получения измерительной информации о физико-химических свойствах, содержании отдельных компонентов и составе нефтепродуктов, нефтей и газового конденсата используются методы и средства измерений, рассмотренные соответственно в гл. 10—12.

В настоящее время из нефти вырабатывается более 500 видов продуктов, однако в основном (90—95%) нефть перерабатывается на жидкие топлива (автомобильные и авиационные бензины, реактивные и дизельные топлива, мазут).

Практически все средства измерений показателей качества нефтепродуктов относятся к тепловым средствам аналитической техники (см. гл. 9).

§ 13.2. Средства измерений фракционного состава

Под фракционным составом многокомпонентных смесей понимают зависимость температуры выкипания отдельных фракций от их содержания в пробе анализируемого вещества или зависимость содержания этих фракций в пробе анализируемого вещества от температуры их выкипания.

Для получения информации о фракционном составе используется разделение (фракционирование) анализируемого вещества по температурам кипения путем перегонки обычно при атмосферном давлении.

Ввиду того, что многокомпонентные смеси при повышении температуры кипят непрерывно, для них и для их отдельных фракций нельзя определить температуры кипения. Вместо понятия «температура кипения» чаще применяют понятие «температура перегонки».

Фракционный состав — один из основных показателей качества бензинов, керосинов, реактивных и дизельных топлив, мазута и других жидких нефтепродуктов, газового конденсата, различных растворителей и многих продуктов нефтехимической, химической отраслей промышленности.

Рассмотрим принцип измерения этого показателя, используемый в лабораторной практике.

На рис. 13.1, *a* показаны схемы лабораторной установки для определения фракционного состава по стандартному методу. Она позволяет осуществлять перегонку до температуры 320°C. Более высококипящие фракции на ней определить не удастся ввиду начинающегося разложения.

Установка содержит стеклянную колбу 1 (колба Энглера), стеклянный термометр 2 (укреплен на пробке, имеет шкалу от 0 до 360°C), газовую горелку 6 (или электрический нагреватель), холодильник 4, снабжаемый проточной водопроводной водой, и мерный цилиндр 5 (на 100 см³). Размеры и конструкции всех узлов установки стандартизованы, что в сочетании со стандартизованной методикой проведения измерения обеспечивает получение воспроизводимых результатов. Для анализа в колбу 1 заливают 100 см³ обезвоженного анализируемого вещества, имеющего температуру (20±3)°C, вставляют термометр 2 и располагают горелку 6 под колбой 1. Расход газа подбирают таким, чтобы время предварительного нагрева при перегонке бензина и лигроина составляло 5 — 10 мин, керосина, реактивного и легкого дизельного топлива — 10—15 мин, тяжелого дизельного топлива — 10—20 мин. Образующиеся при нагревании в паровом пространстве колбы 1 пары анализируемого вещества поступают в холодильник 4, конденсируются и в виде конденсата стекают в мерный цилиндр 5. Температуру, при которой

в мерный цилиндр 5 из холодильника выпадает первая капля анализируемого вещества, называют *температурой начала перегонки (начала кипения)* $t_{\text{нк}}$ (см. рис. 13.1, б, в).

Перегонка проводится с примерно постоянной скоростью (4—5 см³/мин). Для представления результатов анализа используют один из двух способов.

Способ 1. Заранее задаются несколькими значениями концентраций $c_1, c_2, c_3, \dots, c_i, \dots, c_n$ (рис. 13.1, б) и определяют температуру выкипающих фракций.

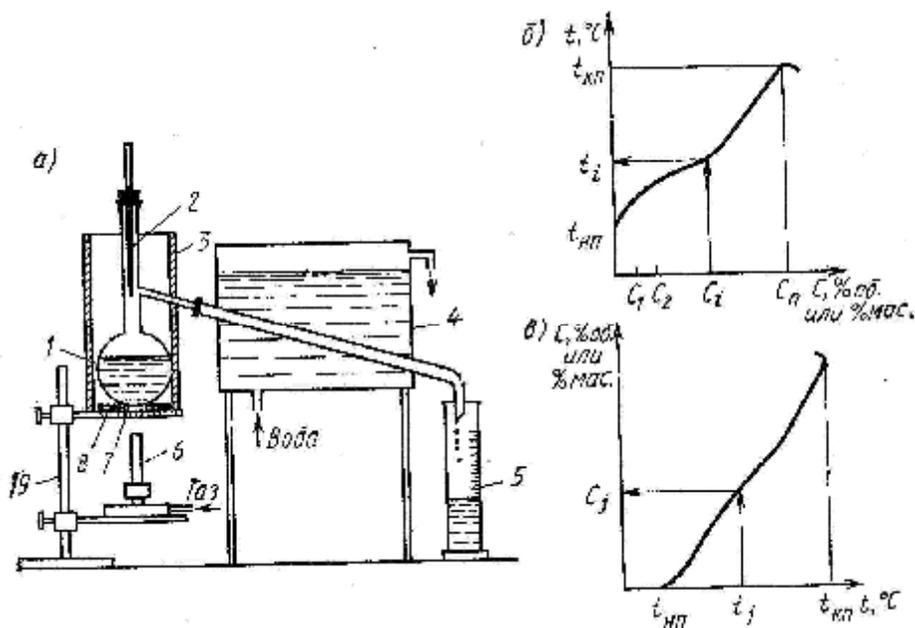


Рис. 13.1. Схема установки для определения фракционного состава стандартным методом (а) и кривые фракционного состава (б, в):

1 — колба; 2 — стеклянный термометр; 3 — защитный кожух; 4 — холодильник; 5 — мерный цилиндр; 6 — горелка; 7 — асбестовая прокладка; 8 — решетка; 9 — штатив

Способ 2. Задаются несколькими значениями температуры $t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n$ и определяют концентрации выкипевших фракций. Концентрация определяется на рассматриваемой установке как отношение объема фракции, поступившей в мерный цилиндр, к объему пробы анализируемого вещества. Указанное отношение называют также *выкипаемостью* при соответствующей температуре или *степенью отгона (отгоном)* (рис. 13.1, в).

Обычно определяют температуры перегонки для концентраций 10, 50, 90, 97—98% или концентрации при температурах 75, 100, 200, 260, 270°C. В процессе перегонки температура, показываемая термометром 2, постепенно возрастает (см. рис. 13.1, б, в), достигает максимума, а затем уменьшается. Это вызвано тем, что практически вся проба анализируемого вещества уже выкипела, вследствие чего количество паров, омывающих термометр, резко уменьши-

лось. Эту максимальную температуру называют *температурой конца перегонки (конца кипения)* $t_{\text{кн}}$ (см. рис. 13.1, б, в).

Для двух параллельных перегонок допускается расхождение для температуры начала перегонки 4°C , а для конца и промежуточных точек фракционного состава 2°C или 1 см^3 .

Показанные на рис. 13.1, б, в кривые называют *кривыми фракционного состава*.

Существуют стандартные методики и установки для определения фракционного состава, в соответствии с которыми содержание фракций представляется массовой концентрацией. В настоящее время в разработках средств измерений фракционного состава сложились две тенденции.

В соответствии с первой в основном осуществляется автоматизация стандартных установок для определения фракционного состава. Причем с помощью анализатора получают информацию сразу о всех перечисленных характерных точках кривой фракционного состава. Анализатор при этом представляет собой достаточно сложное устройство циклического действия (продолжительность цикла 30—60 мин).

В соответствии со второй тенденцией работа анализатора строится на принципе, отличающемся от стандартного. При этом он обеспечивает получение информации о какой-либо одной характерной точке кривой фракционного состава и является, устройством непрерывного или циклического действия с малой продолжительностью цикла.

В данном параграфе рассматриваются автоматические анализаторы фракционного состава, построенные в соответствии с первой из названных тенденций. В § 13.3 приведены описания анализаторов, реализованных в соответствии со второй тенденцией.

Известно несколько разновидностей автоматических анализаторов фракционного состава, реализующих рассмотренный выше стандартный метод анализа. Эти анализаторы отличаются друг от друга в основном конструкцией узла измерения количества фракций, сконденсировавшихся после перегонки. На рис. 13.2 приведена принципиальная схема наиболее распространенного автоматического анализатора фракционного состава. Данный анализатор является устройством циклического действия и работает в двух режимах: «Подготовка» и «Анализ».

В режиме «Подготовка» анализируемое вещество из блока подготовки 1, где оно охлаждается и очищается от механических примесей и воды, поступает в металлическую колбу 3, снабженную электронагревателем 17 и термоэлектрическим чувствительным элементом 4, через открытый электроуправляемый клапан 2. Вещество выводится из колбы через сифонную трубку 5 и открытый электроуправляемый клапан 6. Для управления клапанами 2 и 6 и всем анализатором в целом служит блок управления 15.

В режиме «Подготовка» из колбы удаляется остаток и она охлаждается. После этого по команде блока 15 закрывается клапан 2,

и излишки анализируемого вещества удаляются из колбы с помощью сифонной трубки 5. В колбе при этом остается 100 см³ анализируемого вещества. Затем закрывается клапан 6, подается напряжение питания от блока 15 к нагревателю 17 и анализатор переходит в режим «Анализ». Сигнал термоэлектрического чувствительного

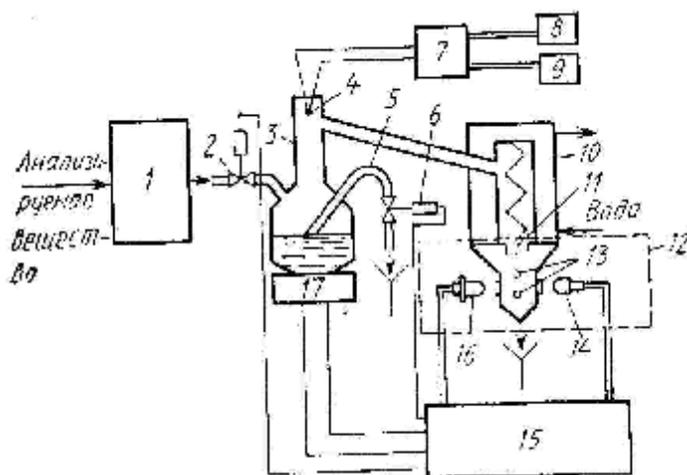


Рис. 13.2. Схема автоматического анализатора фракционного состава

элемента воспринимается нормирующим преобразователем 7, преобразуется в унифицированный сигнал постоянного тока, который при необходимости преобразуется с помощью электропневматического преобразователя 8 в пневматический унифицированный сигнал и одновременно измеряется и регистрируется автоматическим потенциометром 9.

В режиме «Анализ» образующиеся при нагревании пары поступают в холодильник 10, и образовавшийся конденсат стекает в узел 12, служащий для измерения количества выкипевших фракций. Здесь с помощью каплеформирователя 11 поток конденсата преобразуется в отдельные капли 13, которые, пролетая между лампой 16 и фотоэлементом 14, изменяют фотопоток, поступающий от первой ко второму. Таким образом, частота падения капель преобразуется в частоту электрических импульсов, поступающих от фотоэлемента в блок управления 15. Здесь с помощью регулятора постоянства скорости перегонки число импульсов, поступающих в единицу времени (расход), сравнивается с заданным и соответствующим образом изменяется значение напряжения, подаваемого к нагревателю 17. Одновременно число импульсов используется в блоке 15 для управления лентопротяжным механизмом потенциометра 9, который включается в работу, а затем выключается при поступлении в блок управления количества импульсов, соответствующего перегонке 10, 50 и 90% фракций. Продолжительность одного цикла работы прибора составляет 55 мин. Погрешность измере-

ния температуры выкипания фракций $\pm 2^\circ\text{C}$. Расход анализируемого вещества на один цикл работы 1500—2000 см³.

На рис. 13.3 показана принципиальная схема анализатора фракционного состава [34], в котором количество фракций, выкипающих в единицу времени, т. е. расход, измеряется с помощью денситометрического газового детектора (см. гл. 10).

Анализаторы такого типа называют эвапорографическими (от лат. *evaporation* — испарение и от греч. *grapho* — пишу).

Измерение количества фракций в газовой фазе позволяет существенно уменьшить количество анализируемого вещества (до 1 — 5 см³), необходимого для измерения, и сократить на порядок время анализа. Такие возможности обеспечиваются тем, что объем паров фракций в несколько сотен раз больше объема этих фракций в жидкой фазе, а газовые детекторы имеют высокую чувствительность.

Режим работы «Подготовка» в эвапорографическом анализаторе фракционного состава аналогичен рассмотренному для анализатора (см. рис. 13.2).

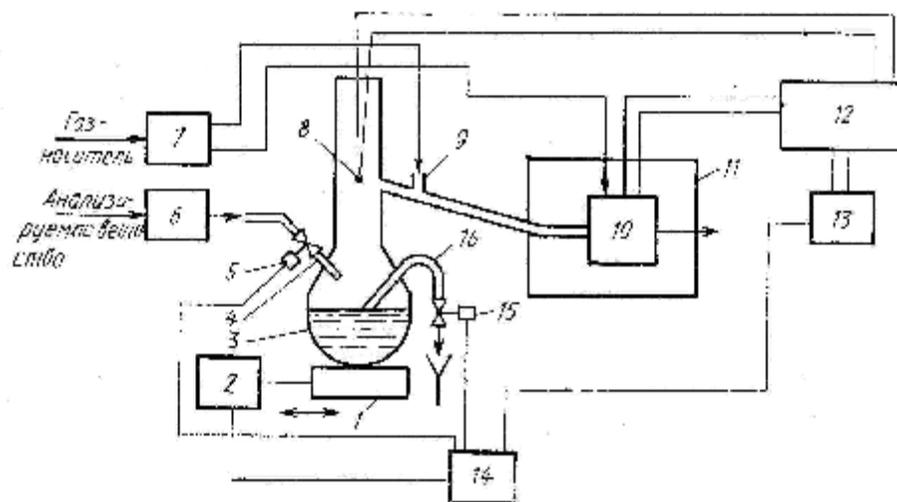


Рис. 13.3. Схема автоматического эвапорографического анализатора фракционного состава: 1 — электронагреватель; 2 — привод электронагревателя; 3 — колба для перегонки; 4 — трубка; 5 и 15 — управляемые клапаны; 6 — блок подготовки анализируемого вещества; 7 — блок подготовки газа-носителя; 8 — термоэлектрический чувствительный элемент; 9 — штуцер ввода газа-носителя; 10 — денситометрический детектор; 11 — термостат; 12 — вычислительное устройство; 13 — электронный потенциометр; 14 — устройство управления

В режиме «Анализ» привод 2 по сигналу блока управления 14 размещает электродвигатель / под колбой для перегонки 3. В процессе перегонки пары выкипающих фракций подхватываются газом-носителем, поступающим с постоянным объемным расходом в трубку 9 из блока 7, и транспортируются в денситометрический газовый Детектор 10, размещенный в термостате 11, температура которого

поддерживается большей температуры конденсации паров наиболее тяжелых фракций анализируемого вещества. По окончании режима работы «Анализ» нагреватель 1 приводом 2 удаляется из-под колбы 3.

Сигнал денситометрического детектора, пропорциональный массовому расходу паров выкипающих фракций, и сигнал термоэлектрического чувствительного элемента 8 поступают в вычислительное устройство 12. Последнее интегрирует сигнал детектора в процессе всего анализа, определяет температуры выкипания, соответствующие анализируемым фракциям, и обеспечивает представление информации в виде кривой фракционного состава на диаграмме электронного потенциометра 13.

Время одного цикла работы анализатора 5 мин; объем пробы анализируемого вещества 3 см³; расход анализируемого вещества 5000—8000 см³/ч; погрешность измерения $\pm(2—2,5)^\circ\text{C}$.

§ 13.3. Средства измерений температур перегонки для характерных точек кривой фракционного состава

Информация о температуре начала и конца перегонки, а также о температуре перегонки промежуточных фракций может быть получена с помощью более простых анализаторов, обладающих высокой надежностью и малой инерционностью по сравнению с рассмотренными в § 13.2. На рис. 13.4 приведена принципиальная схема анализаторов температуры начала перегонки не прерывного действия. В основу работы данного анализатора положен принцип перегонки, называемый однократным испарением. Перегонка осуществляется в колонке высотой 30 см при условии полного орошения. Из блока подготовки 1, где стабилизируется давление и расход анализируемого вещества, а само анали-

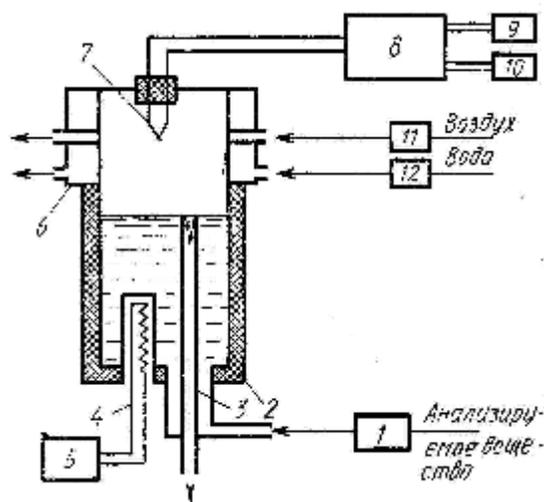


Рис. 13.4. Схема автоматического анализатора температуры начала перегонки

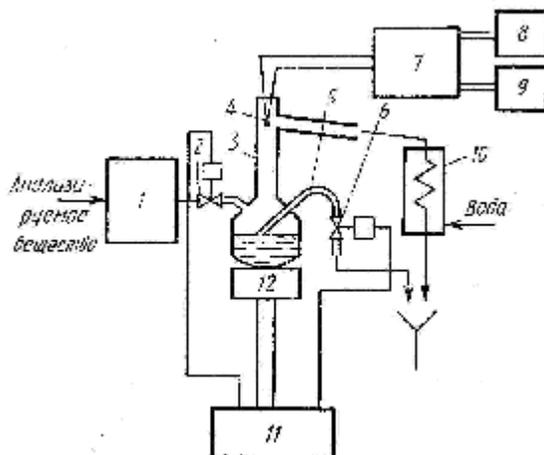
зируемое вещество очищается и подогревается до некоторой постоянной температуры, меньшей температуры начала перегонки, оно поступает в колонку 2, уровень в которой поддерживается с помощью переливной трубки 3. Здесь анализируемое вещество нагревается нагревателем 4, питающимся от блока питания 5, до температуры,

большей температуры начала перегонки. Мощность, подводимую к нагревателю, подбирают при настройке анализатора в зависимости от вида анализируемого вещества. Образовавшиеся пары поступают в верхнюю часть колонки 2, снабженную водяной рубашкой 6, и конденсируются.

Таким образом, рассматриваемый анализатор действует как однотарельчатая перегонная колонна. В зоне конденсации паров размещен термоэлектрический чувствительный элемент 7, сигнал которого, пропорциональный температуре начала перегонки, поступает на нормирующий преобразователь 8, а из этого устройства на нормирующий преобразователь 9 и электропневматический преобразователь 10. Для удаления водяных паров и несконденсировавшихся компонентов паровое пространство колонны 2 продувается воздухом с небольшим расходом (250 см³/мин). Расход воды и воздуха стабилизируется регуляторами расхода 12 и 11.

Данный анализатор при соответствующем выборе места расположения термоэлектрического чувствительного элемента позволяет получать информацию о температуре выкипания 10% фракций.

Диапазон измеряемых данным анализатором температур 65—180°C; расход анализируемого вещества 3000—4500 см³/ч; погрешность измерения температуры начала перегонки ±4°C; погрешность измерения температуры выкипания 10% фракции — ±2°C; время реакции 3—5 мин.



Для автоматического измерения температуры конца перегонки применяется анализатор, схема которого показана на рис. 13.5. Это упрощенный вариант анализатора фракционного состава, осуществляющего перегонку в ускоренном режиме. Назначение всех узлов этого анализатора аналогично упомянутому (см. рис. 13.2). В рассматриваемом анализаторе температуры конца перегонки отсутствует Устройство для измерения количества сконденсировавшихся фракций. Температура конца перегонки, соответствующая 97—98% выкипания пробы анализируемого вещества, определяется как максимальная температура в процессе перегонки (см. рис. 13.1, б, в). Объ-

ем пробы анализируемого вещества 50 см^3 ; расход анализируемого вещества на один цикл $700\text{—}900 \text{ см}^3$; диапазон измерений температур конца перегонки $60\text{—}360^\circ\text{C}$; время одного цикла $12,5 \text{ мин}$; погрешность $\pm 2^\circ\text{C}$.

Для целей управления процессами, связанными с переработкой нефти и нефтепродуктов, часто бывает необходимо иметь информацию о температурах перегонки промежуточных фракций, например 30, 50 или 90% фракций. Схема анализатора непрерывного действия, применяемого для измерения этих температур, приведена на рис. 13.6.

В этом анализаторе однократное испарение анализируемого вещества осуществляется по методу «падающей пленки». Анализируемое вещество из блока

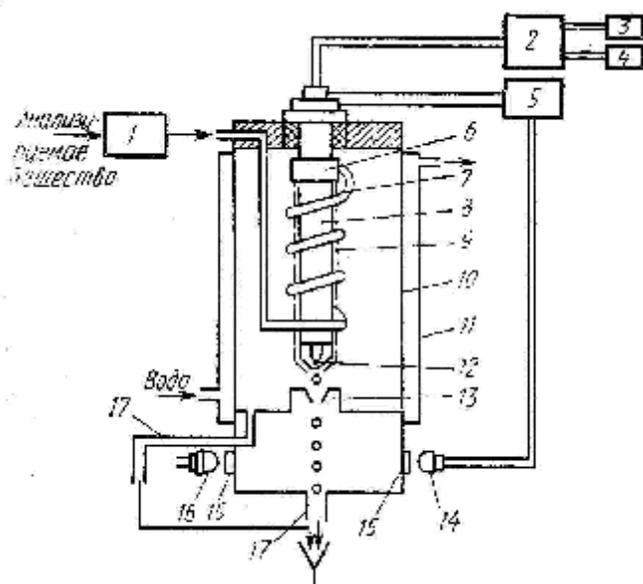


Рис. 13.6. Схема автоматических анализаторов температуры выкипания промежуточных фракций

подготовки 1 с постоянными температурой и объемным расходом поступает в змеевик 7, где оно нагревается до некоторой температуры за счет энергии паров, образовавшихся при испарении предыдущих порций анализируемого вещества. Затем анализируемое вещество поступает в устройство 6, обеспечивающее его равномерное распределение по поверхности испарителя 8. Вещество стекает пленкой 9 по поверхности испарителя и частично испаряется. Пары конденсируются на стенке емкости 10, снабженной водяной рубашкой 11, и выводятся из анализатора по трубке 17. Оставшиеся на испарителе фракции стекают в каплеобразователь 13, предварительно омывая спай термоэлектрического чувствительного элемента 12. Из каплеобразователя неиспарившиеся фракции в виде капель определенного размера удаляются, пересекая при своем падении луч, поступающий от лампы 16 через окна 15 к фотоприемнику 14, электрические импульсы которого поступают в электронный регулятор 5. Последний, изменяя напряжение, подводимое к испарителю 8, поддерживает постоянным число капель, образующихся в единицу времени. Сигнал термоэлектрического чувствительного элемента 12 преобразуется нормирующим преобразователем 2 в унифицированный, а сигнал последнего посылается на электронный потенциометр 3 и

температурой и объемным расходом поступает в змеевик 7, где оно нагревается до некоторой температуры за счет энергии паров, образовавшихся при испарении предыдущих порций анализируемого вещества. Затем анализируемое вещество поступает в устройство 6, обеспечивающее его равномерное распределение по поверхности испарителя 8. Вещество стекает пленкой 9 по поверхности испарителя и частично испаряется. Пары конденсируются на стенке емкости 10, снабженной водяной рубашкой 11, и выводятся из анализатора по

электропневматический преобразователь 4. Путем изменения задания регулятору 5 можно перенастраивать данный анализатор для измерения температуры перегонки промежуточных фракций, так как фактически регулятор поддерживает заданное значение неиспарившейся фракции.

Диапазон измерений температур перегонки данного анализатора 110—360°C, расход анализируемого вещества 3000—4500 см³/ч; погрешность ±2°C; время реакции 3—5 мин.

§ 13.4. Средства измерений выкипаемости при заданной температуре и испаряемости

Выкипаемость (или степень отгона) (см. § 13.2) может быть определена в объемных (чаще), массовых или мольных концентрациях. На рис. 13.7 показана схема автоматического анализатора выкипаемости циклического действия, реализующего эвапорографический метод анализа [34].

В режиме работы «Подготовка» анализируемое вещество поступает из блока подготовки 1 в автоматический дозатор золотникового типа с мембранным приводом (см. § 12.3). При этом подвижная пластина 6 находится в крайнем левом (на рис. 13.7) положении и отверстие 5, которое является дозирующим объемом, промывается анализируемым веществом. После завершения режима «Подготовка» под действием пневматических сигналов P_1 и P_2 , поступающих от блока управления 13, подвижная пластина 6 перемещается в крайнее правое (на рис. 13.7) положение. Отверстие 5, заполненное анализируемым веществом, совмещается с полостью 4 в неподвижной пластине 3.

Начинается режим работы «Анализ». За счет теплоты, подводимой к неподвижной пластине 7 нагревателем 12, происходит постепенное выкипание части пробы анализируемого вещества. По мере выкипания образующиеся пары подхватываются потоком газа-носителя, поступающим из блока подготовки газов 2, и транспортируются в денситометрический или равночувствительный газовый детектор 8.

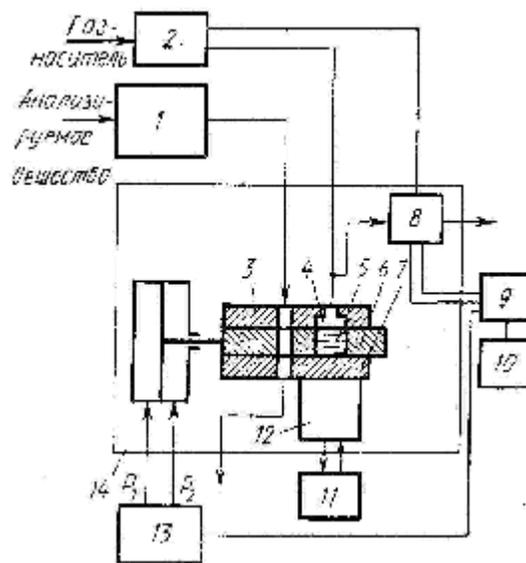


Рис. 13.7. Схема автоматических выкипаемых анализаторов при заданной температуре

(см. рис. 10.2, *г* или 11.2, *а*), сигнал которого интегрируется и запоминается на один цикл работы анализатора вычислительным устройством 9. Унифицированный выходной сигнал последнего, пропорциональный массе или объему выкипевших при данной температуре нагревателя 12 фракций, измеряется и регистрируется потенциометром или вторичным пневматическим прибором 10 в зависимости от электрического или пневматического исполнения анализаторов.

Дозатор и детектор размещены в термостате 14. Путем подачи электроэнергии или пара регулятор 11 поддерживает постоянной температуру нагревателя 12. Эту температуру принимают равной температуре, при которой измеряется выкипаемость анализируемого вещества.

В данном анализаторе расход анализируемого вещества 4000—5000 см³/ч, расход газа-носителя 2000—4000 см³/ч (зависит от типа детектора), продолжительность одного цикла 5 мин, класс точности 3.

Испаряемость жидких веществ, используемых в качестве топлива, является

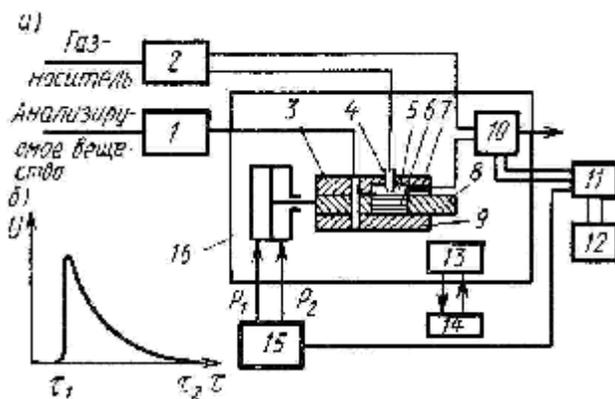


Рис. 13.8. Схемы автоматических анализаторов испаряемости

одной из важнейших характеристик, определяющих их моторные свойства. Исключительно важна роль испаряемости для нормального протекания процесса горения топлива в карбюраторных дизельных реактивных двигателях, так как процессу горения топлива в них предшествует процесс его распыления, имеющий целью испарение топлива. От испаряемости топлива зависит образование паровоздушных пробок в трубопроводах

двигателей и явление кавитации в насосах при перекачке топлива. Учет испаряемости очень важен при хранении топлива. Испаряемость определяется количеством (объемом или массой) паров, испаряющихся с единицы поверхности жидкости в единицу времени. Приблизительно об испаряемости судят по фракционному составу, однако этого во многих случаях недостаточно.

На рис. 13.8, *а* приведена схема автоматического анализатора испаряемости. Он реализует эвапорографический метод анализа испаряемости и работает циклически. В режиме работы «Подготовка» анализируемое вещество из блока подготовки 1 поступает в автоматический дозатор с мембранным приводом. При этом подвижная пластина 8 находится в крайнем левом (на рисунке) положении и отверстие б, ко-

торое является дозируемым объемом, промывается анализируемым веществом. После завершения режима «Подготовка» под действием пневматических сигналов P_1 и P_2 , поступающих от блока управления 15, подвижная пластина 8 перемещается в крайнее правое положение, отверстие б, заполненное анализируемым веществом, совмещается с полостью 5 в неподвижной пластине 3. Начинается режим работы «Анализ». Поток газа-носителя, поступающий из блока подготовки газов 2 через сопло 4 перпендикулярно поверхности анализируемой жидкости, постепенно испаряет ее при температуре, несколько меньшей температуры начала перегонки. Испаряющиеся фракции выводятся через штуцер 7 газом-носителем и транспортируются в равночувствительный газовый детектор 10 (см. гл. 11, 12). Сигнал U последнего при постоянном объемном расходе газа-носителя и постоянной площади поперечного сечения отверстия б пропорционален в каждый момент времени мгновенной объемной скорости испарения и для нефтяных топлив имеет форму кривой, называемой эвапограммой (рис. 13.8,б).

Вычислительное устройство 11 определяет площадь сигнала, продолжительность испарения, т. е. разность ($\tau_2 - \tau_1$), и отношение указанной площади к продолжительности испарения. Унифицированный выходной сигнал вычислительного устройства пропорционален средней за отрезок времени ($\tau_2 - \tau_1$) объемной скорости испарения, принимаемой в качестве характеристики испаряемости нефтяных топлив. Этот сигнал измеряется и регистрируется потенциометром или вторичным пневматическим прибором 12 (в зависимости от электрического или пневматического исполнения анализатора). Дозатор и детектор размещены в термостате 16, температура в котором стабилизируется регулятором 14 путем подачи электрической энергии или пара к нагревателю 13.

Расход анализируемого вещества 4000—5000 см³/ч, расход газа-носителя (воздух или водород) 2000—40 000 см³/ч (зависит от типа детектора), продолжительность одного цикла 5 мин, класс точности 3.

§ 13.5. Средства измерений температуры вспышки

Температурой вспышки называют температуру жидкости, при которой ее пары при определенных условиях нагревания образуют с окружающим воздухом смесь, вспыхивающую при поднесении к ней пламени. По мере нагревания жидких нефтепродуктов увеличивается содержание их паров в смеси «воздух—пар», образующейся над поверхностью нефтепродукта. При поднесении пламени к этой смеси происходит взрыв, а дальнейшего горения нефтепродуктов не возникает из-за отсутствия сразу после взрыва его паров в воздухе. Для различных нефтепродуктов вспышка возникает примерно при одних и тех же объемных концентрациях паров в смеси «воздух—пар».

В настоящее время температура вспышки является нормируемым показателем качества для смазочных масел, дизельных, котельных и реактивных топлив, осветительных и тракторных керосинов, бензинов-растворителей и других продуктов. Этот показатель качества является наиболее часто определяемым на нефтеперерабатывающих предприятиях.

По температуре вспышки определяют содержание низкокипящих фракций в нефтепродукте. Этот показатель характеризует также огнеопасность нефтепродуктов. Уменьшение температуры вспышки соответствует увеличению концентрации легких фракций и увеличению огнеопасности нефтепродуктов.

Температуру вспышки определяют путем анализа в открытом или закрытом тигле. Последний метод анализа дает более воспроизводимые результаты.

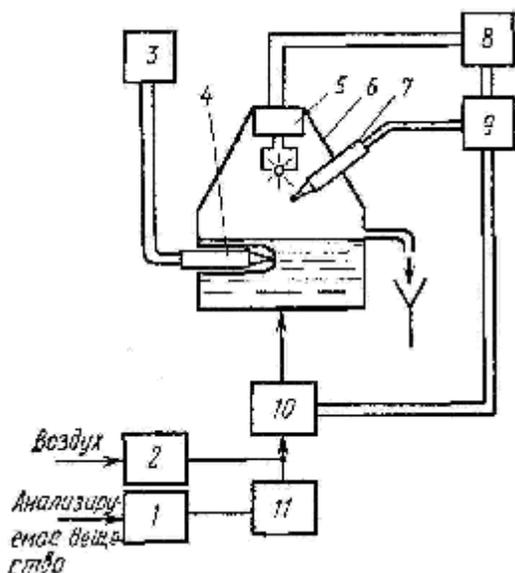


Рис. 13.9. Схема автоматического анализатора температуры вспышки

Поэтому он используется в автоматическом анализаторе температуры вспышки, схема которого показана на рис. 13.9. Анализируемое вещество из блока подготовки 1 с постоянным объемным расходом поступает в предварительный нагреватель 11, на выходе которого к потоку анализируемого вещества примешивается поток воздуха, поступающий с постоянным объемным расходом из блока подготовки 2. Образовавшаяся смесь поступает в

основной нагреватель 10, а из него — в камеру вспышки 6. Если температура смеси, поступающей в камеру 6, достигает температуры вспышки, то происходит вспышка паровоздушной смеси от электрической искры, создаваемой свечой 5,

к которой от генератора 8 периодически (с интервалом 7 с) подается высоковольтное напряжение.

Наличие пламени вспышки изменяет температуру в паровом пространстве камеры 6, что воспринимается термоэлектрическим чувствительным элементом 7. Сигнал элемента 7 подается в блок управления 9, который отключает электропитание основного нагревателя 10. Включение нагревателя 10 производится не раньше, чем будет подана искра, следующая за искрой, вызывающей вспышку. Если произойдет несколько вспышек подряд, то нагреватель 10 остается отключенным. Включение нагревателя 10 произойдет после первой искры, при которой не возникнет вспышки. Таким образом, в камере 6 автоматически поддерживается температура анали-

зируемого вещества на значении, при котором происходит вспышка смеси «воздух — пар».

Температура анализируемого вещества в камере измеряется термоэлектрическим чувствительным элементом 4, сигнал которого воспринимается электронным потенциометром или нормирующим преобразователем 3.

Расход анализируемого вещества 5000 см³/ч, диапазоны измерений температуры вспышки 0—150, 150—300°С; основная погрешность ±(1—3)°С (в зависимости от диапазона измерений), время реакции 15 мин.

§ 13.6. Средства измерений октанового числа

Октановое число является характеристикой антидетонационных качеств топлив. Оно измеряется в основном для бензинов, таким образом определяется пригодность бензина для использования в двигателях внутреннего сгорания. По этому показателю качества осуществляется процесс компаундирования (смешения) бензинов на предприятиях нефтеперерабатывающей промышленности.

Под октановым числом понимают показатель детонационной стойкости топлив (в том числе бензина), численно равный такому процентному (по объему) содержанию изооктана в смеси с нормальным гептаном, при котором детонационные стойкости этой смеси и сравниваемого с ней испытуемого топлива одинаковы.

В лабораторной практике измерение октанового числа осуществляется так называемым моторным методом на специальных двигателях внутреннего сгорания. В основу работы автоматического анализатора октанового числа положено явление возникновения свечения — электромагнитного излучения (так называемое «холодное пламя») при нагревании смеси воздуха и паров нефтяных топлив до температуры порядка 300°С. Это явление связано с частичным окислением паров топлива. Причем свечение сопровождается выделением небольшого количества тепловой энергии. Исследование этого явления позволило установить, что как само свечение, так и выделение тепловой энергии находятся в зависимости от октанового числа.

На рис. 13.10, а показана схема автоматического анализатора октанового числа, основанного на тепловом эффекте явления «холодного пламени». В этом анализаторе анализируемое вещество (бензин) поступает из блока подготовки 1 через управляемый переключатель 14, миниатюрный насос 13 и нагреватель 12 в дозатор 5. В этот же дозатор 5 из блока подготовки газа 3 и нагреватель 4 с постоянным объемным расходом поступает воздух. Согласование работы всех блоков анализатора во времени осуществляется с помощью устройства управления 11 (связи его с другими блоками анализатора не показаны).

Анализатор является устройством циклического действия и имеет три режима работы: «Подготовка», «Анализ» и «Градуиров-

ка». Большую часть времени анализатор работает в режимах «Подготовка» и

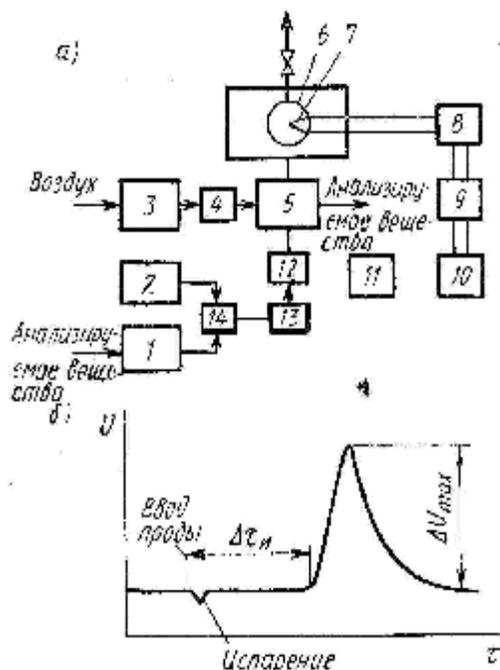


Рис. 13.10. Схема автоматического анализатора октанового числа

анализатора. Через отрезок времени $\Delta\tau_{и}$ с момента ввода пробы, называемый индукционным периодом и длящийся несколько секунд, начинается реакция частичного окисления паров бензина. При этом температура смеси в реакторе увеличивается, достигает максимума, а затем постепенно падает (рис. 13.10, б). Реакция частичного окисления длится 10—15 с.

Как значение $\Delta\tau_{и}$, так и максимальное значение изменения температуры, представляемое изменением сигнала ΔU_{\max} термоэлектрического чувствительного элемента, связаны с октановым числом. В анализаторе (рис. 13.10, а) для измерения октанового числа используется информация о максимальном увеличении температуры в процессе реакции частичного окисления. Для этого сигнал термоэлектрического чувствительного элемента 7 преобразуется нормирующим преобразователем 8 в унифицированный сигнал, который поступает в устройство обработки информации 9, принцип действия которого аналогичен принципу действия устройств для обработки хроматограмм по высоте пиков (см. § 12.3). Выходной электрический или пневматический сигнал (в зависимости от типа используемого устройства 9) регистрируется самопишущим прибором 10.

Через несколько циклов измерения октанового числа анализируемого вещества по команде устройства управления *11* с помощью переключателя *14* на вход насоса *13* подается образцовое топливо из резервуара *2* и осуществляется его анализ. По результатам измерения октанового числа образцового топлива автоматически корректируется коэффициент преобразования преобразователя *8*.

Продолжительность одного анализа 5 мин, диапазон измерений 3—10 единиц октанового числа, погрешность $\pm 0,2$ единиц октанового числа; расход анализируемого вещества $300 \text{ см}^3/\text{ч}$, объем пробы $12 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3$; расход образцового вещества $200 \text{ см}^3/\text{сут}$.

ГЛАВА 14

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В СРЕДСТВАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

§ 14.1. Общие сведения

При выполнении технологических измерений в ряде случаев возникает необходимость проведения различных вычислительных операций, связанных с определением значений измеряемых величин и погрешностей измерений. Кроме того, для рациональной организации процесса автоматического контроля технологических параметров требуется выполнение различных логических операций.

Эти задачи решаются с помощью средств вычислительной техники — вычислительных устройств.

Вычислительные устройства принято подразделять на устройства непрерывного (аналоговые) и дискретного (цифровые) действия.

В аналоговых вычислительных устройствах значения величин, над которыми осуществляются математические операции, изменяются непрерывно. Они изображаются в определенном масштабе в виде других физических величин, например напряжения, тока, давления сжатого воздуха и т. д. Результат выполнения математических операций в аналоговых устройствах получается сразу после ввода исходных данных.

Аналоговые вычислительные устройства отличаются простотой и сравнительно небольшой стоимостью. Их недостаток — ограниченная точность вычислений (погрешность не менее $\pm 0,1$ — $0,5\%$).

В цифровых вычислительных устройствах значения величин, над которыми осуществляются математические операции, представляются в виде набора цифр. Каждая цифра, соответствующая определенному разряду числа, устанавливается на отдельном цифровом элементе: триггере, счетном колесе и др.

Все вычислительные операции в цифровых вычислительных устройствах сводятся к арифметическому сложению и выполняются в течение некоторого промежутка времени.

В процессе выполнения математической операции значения исходных данных не изменяются. Новые выходные данные вводятся в цифровое вычислительное устройство лишь спустя некоторое время, необходимое для выполнения вычислений при прежних данных. Таким образом, цифровые вычислительные устройства работают прерывно во времени (дискретно).

Цифровые вычислительные устройства отличаются практически

неограниченной точностью, большими логическими возможностями и значительным быстродействием.

Аналоговые вычислительные устройства уже давно и широко применяются в средствах технологических измерений для обработки сигналов измерительной информации. Однако из-за ограниченной точности их применение оказывается целесообразным только при реализации относительно простых алгоритмов.

В настоящее время обработка информации, в том числе и измерительной, все больше базируется на цифровых вычислительных устройствах.

Можно выделить два вида цифровых вычислительных устройств, включаемых в средства измерений: устройства с жесткой программой обработки информации и устройства с изменяемой программой обработки информации. Первые из названных устройств имеют жесткую структуру, которая определяется принятой программой обработки информации, составленной в соответствии с реализуемыми функциями. Любое изменение реализуемой функции требует изменения структуры вычислительного устройства. Эти цифровые вычислительные устройства, как и аналоговые, имеют узкую специализацию.

От этого недостатка свободны цифровые вычислительные устройства с изменяемой программой обработки информации, позволяющие решать любые вычислительные задачи. Эти устройства представляют собой цифровые электронные вычислительные машины—ЭВМ, миниЭВМ, микроЭВМ, микропроцессоры (МП).

В измерительных приборах, преобразователях и системах, используемых для технологических измерений, находят применение микроЭВМ и микропроцессоры. Технической базой этих устройств являются большие и сверхбольшие интегральные схемы (БИС и СБИС), содержащие 10^3 — 10^6 элементов на одном кристалле.

Наиболее существенным достижением микроэлектроники и вычислительной техники в последнее время является создание на основе БИС микропроцессоров.

Первая микропроцессорная БИС была создана за рубежом в 1971 г. и сразу привлекла к себе внимание специалистов-разработчиков средств вычислительной техники и цифровой автоматики перспективами широкого применения, обеспечиваемыми возможностью ее программного управления. Появление микропроцессоров расценивается в настоящее время экспертами в области электроники и вычислительной техники как революционное явление, соизмеримое по своей значимости с появлением в 50-х годах первых полупроводниковых элементов и устройств.

Микропроцессор — функционально законченное, управляемое хранимой в памяти программой (большой частью малоразрядное) устройство обработки цифровой информации, выполненное в виде одной или нескольких БИС или СБИС. Это устройство называют микропроцессором, так как оно по своим обычным функциям и структуре напоминает упрощенный вариант процессора обычных

ЭВМ. Миниатюрность, малая масса и малое потребление энергии открыли возможность включения микропроцессора непосредственно в электронную схему измерительных устройств, средств автоматического регулирования и управления. Микропроцессор намного дешевле, более экономичен в работе и надежен, чем процессоры, построенные на интегральных схемах малого и среднего уровня интеграции. В силу того что основой микропроцессора является БИС или СБИС с программируемой логикой, он заменил собой многие типы интегральных схем с жесткой, фиксированной логикой. Изменением программы микропроцессора достигается возможность решения с его помощью множества разнообразных задач.

Микропроцессор используется обычно в составе *микропроцессорного комплекта (набора)*, представляющего собой совокупность специально разработанных отдельных микропроцессорных и других интегральных схем, которые совместимы по своим конструктивно-технологическим данным и могут быть собраны в единое целое. В состав комплекта входят интегральные схемы: микропроцессора, запоминающих устройств, ввода—вывода информации, микропрограммного управления и др.

Микропроцессорные комплекты предназначены для построения цифровых управляющих вычислительных устройств с широкими функциональными возможностями и единым математическим обеспечением, таких, как микропроцессорные системы, микроЭВМ, микроконтроллеры и др.

Микропроцессорная система — это собранная в единое целое совокупность взаимодействующих интегральных схем микропроцессорного комплекта, организованная в работающую систему, т. е. вычислительная или управляющая система с микропроцессором в качестве узла обработки информации.

МикроЭВМ — это конструктивно законченное вычислительное устройство, построенное на основе микропроцессорного комплекта интегральных схем в отдельном



Рис. 14.1. Структурная схема микроЭВМ

корпусе и имеющее источник питания, пульт управления, узлы ввода—вывода информации, что позволяет использовать его в качестве автономного независимо работающего устройства со своим программным обеспечением. Микро-

ЭВМ строят по структуре более простой, чем обычные ЭВМ. Основу этой весьма гибкой структуры, называемой магистрально-модульной (рис. 14.1), составляет общая магистраль (общая шина), к которой подсоединяются в требуемой номенклатуре и количестве все устройства машины, выполненные в виде конструктивно законченных модулей, связанных друг с другом с помощью интерфейсов.

Интерфейс (от англ. *interface* — взаимосвязь) представляет собой совокупность линий и шин сигналов, электронных схем и алгоритмов, предназначенную для осуществления обмена информацией между устройствами цифровой вычислительной техники.

Микроконтроллер (контроллер) — устройство логического управления, выполненное на основе микропроцессоров или микроЭВМ.

§ 14.2. Ввод измерительной информации о технологических параметрах в устройства цифровой вычислительной техники

Как отмечалось, современные средства измерений технологических параметров имеют выходные сигналы в виде постоянного тока, частоты и давления, т. е. являются аналоговыми. Для ввода этих сигналов в средства цифровой вычислительной техники необходимо использовать соответствующие согласующие устройства (или устройства сопряжения). Общая задача, решаемая при этом, состоит в преобразовании сигналов первичных измерительных преобразователей ПИП в электрический кодовый сигнал, воспринимаемый средствами вычислительной техники. Наиболее типичные структурные схемы устройств, используемых для согласования работы средств измерений технологических параметров и средств вычислительной техники, показаны на рис. 14.2.

Преобразование электрического сигнала постоянного тока I в кодовый осуществляется с помощью аналого-цифрового преобразователя АЦП (рис. 14.2, *а*, *б*), а в сигнал частоты f — с помощью частотно-цифрового преобразователя ЧЦП (рис. 14.2, *в*, *г*). Если названные преобразователи (см. приложение 1) используются для преобразования сигналов нескольких первичных измерительных преобразователей, например $ПИП_1—ПИП_n$, то сигналы поочередно подводятся к АЦП (рис. 14.2, *б*) через электрический коммутатор ЭК. Для преобразования сигналов давления P сжатого воздуха, вырабатываемых пневматическими ПИП, обычно используется предварительное преобразование давления в электрический сигнал постоянного тока (рис. 14.2, *д*, *е*, *ж*) с помощью пневмоэлектрического преобразователя ПЭП. При этом если один ПЭП и один АЦП применяются для преобразования сигналов нескольких ПИП, то поочередное подключение ПИП к ПЭП осуществляется с помощью пневматического коммутатора ПК (рис. 14.2, *е*). Если же для преобразования сигнала каждого пневматического ПИП используется индивидуальный ПЭП, то с помощью ЭК (рис. 14.2, *ж*) поочередно осуществляется подключение $ПЭП_1—ПЭП_n$ к АЦП.

Ввод кодового сигнала в средства вычислительной техники осуществляется с помощью так называемых приборных интерфейсов.

Интерфейс для средств измерений (приборный интерфейс) предназначен для обмена информацией между средствами измерений, имеющими выходной сигнал в виде соответствующего кода, и средствами цифровой вычислительной техники.

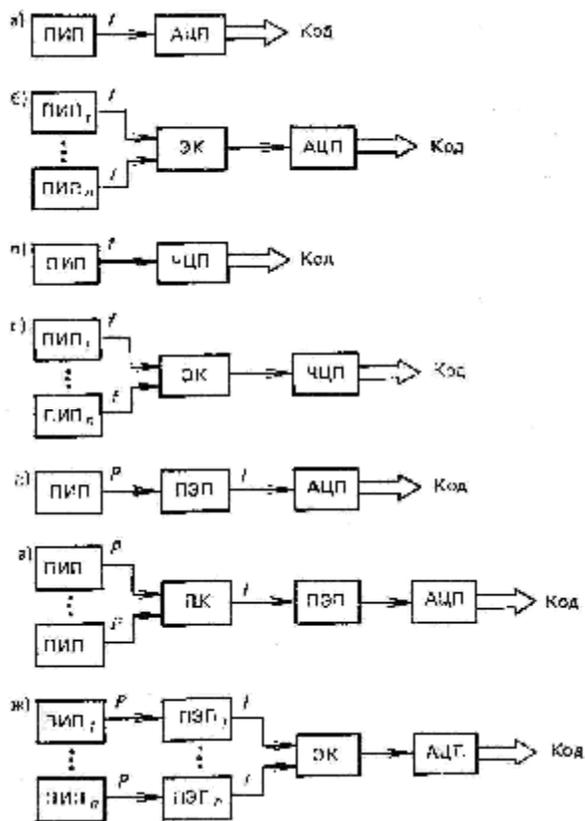


Рис. 14.2. Структурная схема устройств согласования

В последнее время в измерительных системах, - включающих средства цифровой вычислительной техники, применяются приборные интерфейсы магистрального типа (с общей магистралью). К таким интерфейсам относится приборный интерфейс МЭК (IEC — International Electrotechnical Commission), рекомендованный Международной электротехнической комиссией, и интерфейс

КАМАК (САМАС — Computer Automated Measurement and Control).

На рис. 14.3 показана схема подключения нескольких измерительных и вычислительных устройств к общей магистрали. Все подключаемые к этой магистрали устройства называют в данном случае приборами. Интерфейс состоит из общей магистрали для скоростной передачи приборных и интерфейсных сообщений, интерфейсной части средств измерений и других подключаемых устройств (интерфейсы А, Б, В на рис. 14.3), а также устройства управления (контроллера). Подключенный к магистрали прибор может

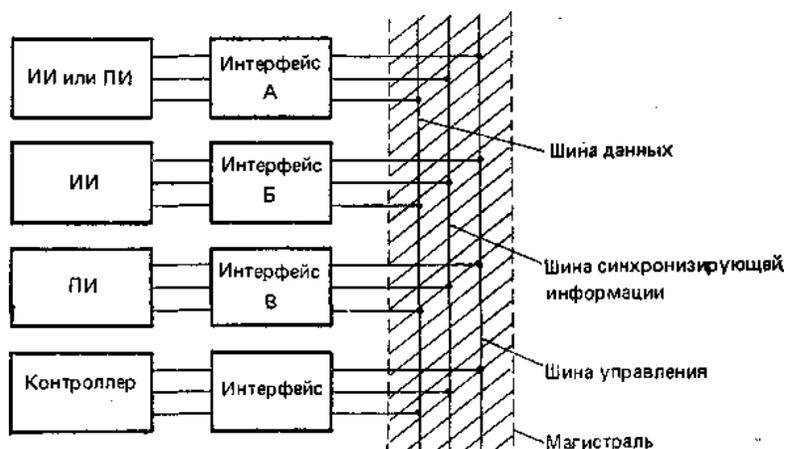


Рис. 14.3. Схема подключения нескольких измерительных и вычислительных устройств к общей магистрали

находиться в следующих состояниях: резерв, функционирование в качестве источника информации (ИИ) и функционирование в качестве приемника информации (ПИ). Таким образом предусматривается возможность управления работой приборов по программе.

Интерфейсные части программно-управляемых приборов выполняют в двух вариантах:

в виде схем, реализованных и конструктивно оформленных внутри прибора как его составная часть, с установкой стандартного разъема на задней панели прибора (этот вариант применяется в новых приборах, выпускаемых в соответствии с действующими международными стандартами);

в виде отдельно выполненных модулей, подключаемых к серийно выпускаемым или ранее выпущенным устройствам с выходным сигналом в виде кода. При подключении к магистрали интерфейсной части измерительных устройств присваивается кодированный адрес.

В магистрали несколько линий, выполняющих определенную функцию, объединены в *шины интерфейса*, а именно: шину данных, шину синхронизации, шину управления (рис. 14.3). Шина данных используется для передачи так называемых *приборных (информационных)* сообщений, к которым относят сообщения о результатах и единицах измерений, последовательности (программе) измерений и т.д. По шинам синхронизации и управления передаются так называемые *интерфейсные* сообщения, обеспечивающие взаимодействие подключенных к магистрали устройств. К интерфейсным относятся сообщения, предписывающие этим устройствам реализацию тех или иных служебных (интерфейсных) функций, таких, как: источник информации, приемник информации, контроллер, синхронизация передачи, приема, запрос на обслуживание, параллельный опрос, очистка устройства, запуск прибора, дистанционное и местное управление.

§ 14.3. Применение средств цифровой вычислительной техники в измерительных устройствах

Современный этап развития приборостроения характеризуется широким применением в составе средств измерений вычислительных устройств, построенных на базе микропроцессоров — микропроцессорных систем. Применением таких систем в измерительных устройствах достигают двух целей: расширяют функции измерительных устройств и улучшают их характеристики.

Использование микропроцессорных систем (МПС) в средствах электрических измерений позволяет по-новому подойти к их компоновке и алгоритмам функционирования, увеличить информационные возможности, повысить точность, надежность и быстродействие.

В области технологических измерений ведется поиск рациональных решений и разработка измерительных устройств со встроенными МПС.

В общем случае включение МПС в состав измерительных устройств позволяет решить такие основные задачи, как:

вычисление по формулам (в том числе линеаризация, масштабирование, обработка результатов косвенных или совокупных измерений и т. п.);

вычисление по заданному алгоритму;

статистическая обработка;

анализ параметра (на максимум, минимум и т. п.);

корректировка статической характеристики (на основе методов повышения точности измерительных устройств);

автоматическая самоградуировка и самопроверка (в частности, восстановление коэффициента преобразования и корректировка нулевого уровня сигнала);

связь с системой, к которой подключено измерительное устройство;

самодиагностика;
управление измерениями;
стабилизация или программное регулирование режимных параметров измерительного устройства.

Однако включение МПС в состав измерительных устройств наряду с сообщением им несомненно новых положительных качеств приводит к существенному усложнению этих устройств. По сложности измерительные устройства со встроенной МПС близки к измерительным системам, включающим микроЭВМ.

В качестве примеров рассмотрим структурные схемы, используемые в настоящее время для создания измерительных устройств технологических параметров (рис. 14.4). Наиболее широкое применение имеет схема (рис. 14.4, *а*), реализующая метод вспомогательных измерений (см. гл. 3). В работе измерительного устройства, построенного по такой схеме, используется информация об основном (измеряемом) параметре P и вспомогательных параметрах P_1 , P_2 — влияющих величинах (окружающая температура, атмосферное давление и т. п.). Учет с помощью МПС через функции влияния действия влияющих величин обеспечивает уменьшение погрешности измерительного устройства. По такой схеме строятся устройства для измерения давления, температуры, уровня, расхода, объема и др. При этом измерения основного и вспомогательного параметров могут осуществляться методом прямого и уравнивающего преобразования.

На рис. 14.4, *б* показана структурная схема измерительного устройства со встроенной МПС, обеспечивающая реализацию измерений по методам образцовых сигналов и совместных измерений (см. гл. 3).

Измерительная часть данного устройства осуществляет измерение параметра P , меры (набора мер) M , а также совместное измерение параметра P и набора мер. Обработка информации и управление процессом измерения осуществляет МПС.

Измерительное устройство, построенное по схеме (рис. 14.4, *в*), включает в свой состав операционный узел OU , в котором с помощью устройства формирования управляющих воздействий УФУВ по командам МПС осуществляются необходимые для выполнения измерения переключения элементов, в результате которых формируется воздействие (воздействия) измеряемого параметра P на чувствительный элемент $ЧЭ$.

Схемы (рис. 14.4, *б*, *в*) находят применение при создании измерительных устройств массы, объема, плотности жидких сред и др. [32].

Наиболее эффективным применением МПС считается их использование в средствах аналитической техники, где наряду с измерением основного и ряда вспомогательных параметров требуется осуществлять управление (логическое и аналоговое) узлами аналитического устройства и проводить в большом объеме вычисления, связанные с обработкой информации.

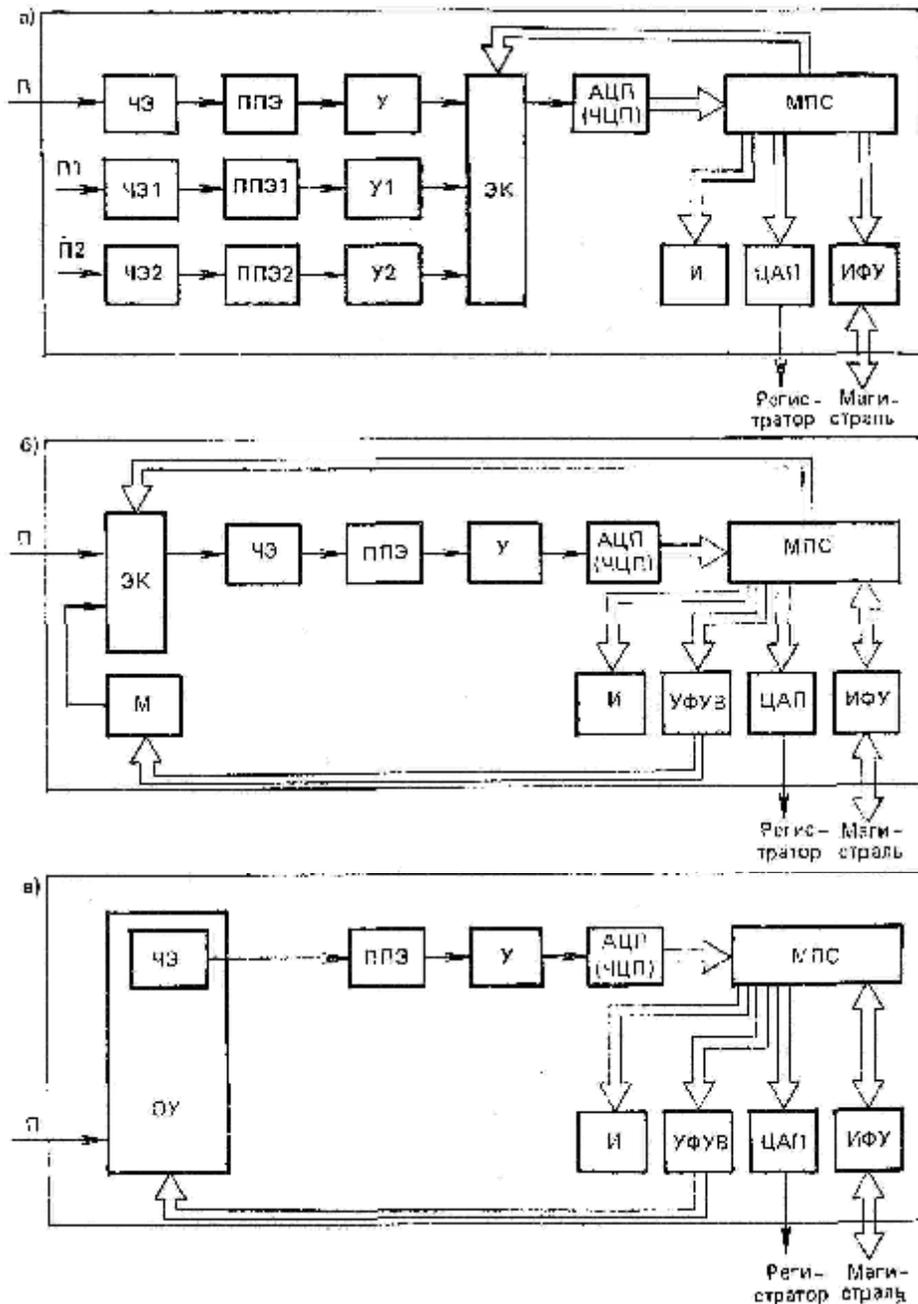


Рис. 14.4. Структурные схемы устройств для технологических измерений со встроенной МПС:

ЧЭ, ЧЭ1, ЧЭ2 — чувствительные элементы; ППЭ, ППЭ1, ППЭ2 — промежуточные преобразовательные элементы; У, У1, У2 — усилители; ЭК — электрический коммутатор; ИФУ — интерфейсное устройство; М — мера (набор мер); УФУВ — устройство формирования управляющих воздействий; ОУ — операционный узел; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; ЧЦП — частотно-цифровой преобразователь; ЦАП — цифроаналоговый преобразователь, МПС — микропроцессорная система; И — индикатор цифровой

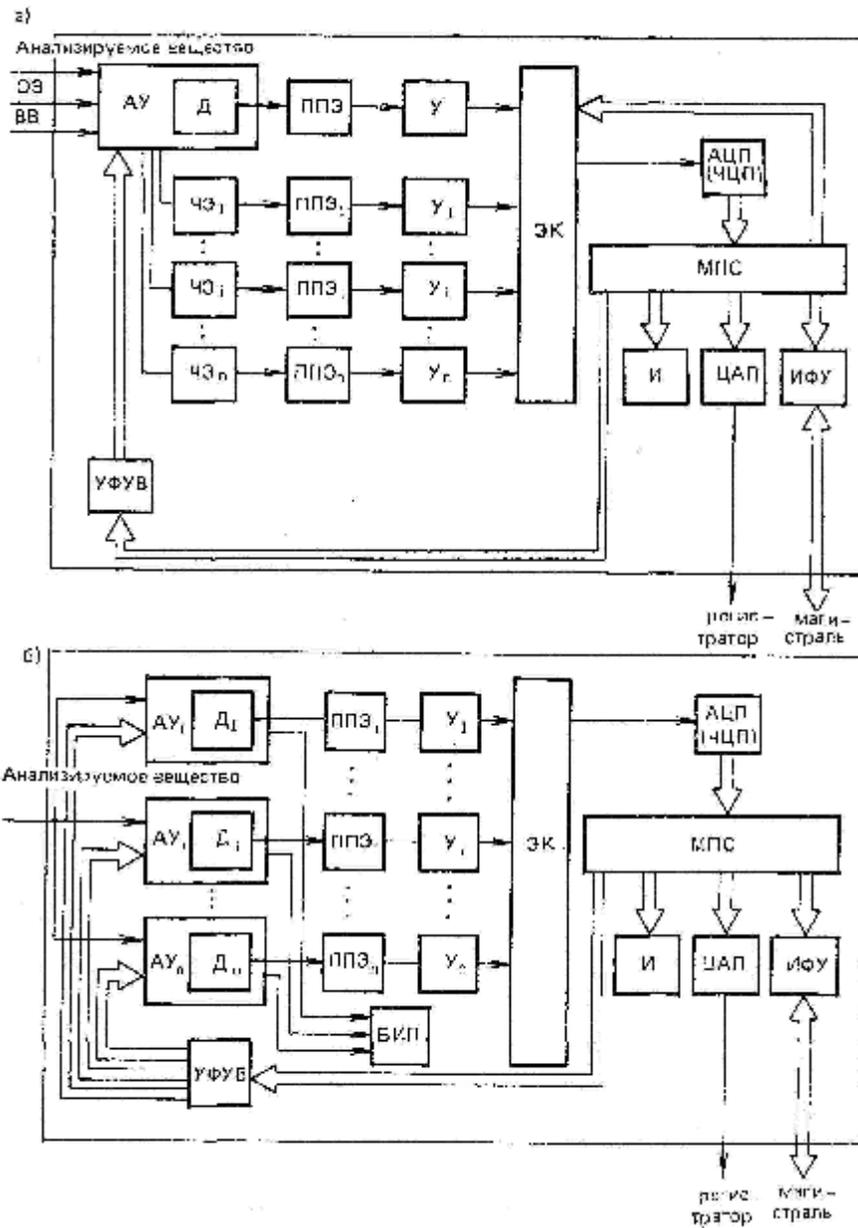


Рис. 14.5. Структурные схемы анализаторов качества со встроенным МПС: $AU, AU_1, AU_2, \dots, AU_n$ — аналитические устройства; D, D_1, D_2, \dots, D_n — детекторы; $БИП$ — блок измерения параметров аналитических устройств (остальные обозначения приведены на рис. 14.4)

Параметры химико-технологических процессов, измеряемые с помощью измерительных устройств со встроенными МПС

Измеряемый параметр	Вспомогательный измеряемый параметр	Информация, сохраняемая в памяти вычислительного устройства
Давление	Температура ЧЭ давления	Статические характеристики ЧЭ давления и температуры. Функция влияния температуры на сигнал измерительного устройства
Расход (по перепаду давления на сужающем устройстве)	Температура ЧЭ перепада давлений	Статические характеристики сужающего устройства, ЧЭ перепада давлений и температуры. Функция влияния температуры на сигнал измерительного устройства
Температура (термоэлектрическим ЧЭ)	Температура «холодного спая»	Статические характеристики термоэлектрических ЧЭ и терморезисторов для измерения температуры «холодного спая»
Температура (пирометром спектрального отношения)	—	Статическая характеристика фотометра, длины волн, принятые для определения спектрального отношения
Объем жидкости в резервуаре (по уровню)	Температура ЧЭ уровня	Статические характеристики ЧЭ уровня и температуры. Функции влияния температуры на сигнал измерительного преобразователя уровня. Тарировочная характеристика резервуара
Масса жидкости в резервуаре (по гидростатическому давлению)	Температура ЧЭ давления	Статические характеристики ЧЭ давления, температуры, Функции влияния температуры на сигнал измерительного преобразователя давления. Тарировочные характеристики резервуара
Физико-химические свойства, показатели качества, концентрация, состав	Температура аналитического устройства, расход и давление анализируемого, вспомогательного и образцового веществ, атмосферное давление, режимные параметры электрических цепей	Статические характеристики ЧЭ температуры, давления, расхода, тока, напряжения. Функции влияния для параметров, по которым осуществляется коррекция статической характеристики анализатора. Справочные данные и константы, необходимые для обработки измерительной информации, и др.

На рис. 14.5, *а* показана обобщенная структурная схема автоматического анализатора качества. В анализаторах, осуществляющих измерение одного параметра, основной сигнал измерительной информации формируется в аналитическом устройстве *АУ* с помощью того или иного детектора *Д*. Для уменьшения погрешности анализатора и обеспечения его нормального функционирования с помощью ряда чувствительных элементов осуществляется измерение ряда параметров, по значениям которых корректируется статическая характеристика, стабилизируются режимные параметры аналитического устройства и осуществляются необходимые для проведения анализа переключения. Две последние функции реализуются МПС через УФУВ. В аналитический блок помимо анализируемого и вспомогательного (*ВВ*) веществ предусматривается возможность подачи образцового вещества (*ОВ*), что обеспечивает периодическую самоградуировку анализатора.

В анализаторах (рис. 14.5, *б*), реализующих многопараметрические методы анализа состава (см. гл. 12), используется несколько аналитических устройств с соответствующими детекторами.

Все необходимые измерения вспомогательных и режимных параметров осуществляются блоком измерения параметров аналитических устройств *БИП*, который коммутируется с блоком *ЭК* (на рис. 14.5, *б* связь между *БИП* не показана). Сигналы, необходимые для управления работой этих устройств, и стабилизация их режимных параметров вырабатываются МПС и поступают к аналитическим устройствам через УФУВ. В табл. 14.1 приведены технологические параметры, для которых уже сейчас созданы измерительные устройства со встроенными микропроцессорными системами.

§ 14.4. Применение средств цифровой вычислительной техники в измерительных системах

Измерительные системы (ИС), представленные на рис. 2.10, *а*, *б*, имеют в настоящее время широкое применение в системах автоматического контроля, регулирования и управления химико-технологическими процессами. Измерительные системы с несколькими первичными измерительными преобразователями ПИП с одним вторичным прибором (см. рис. 2.10, *б*) имеют ограниченные функциональные возможности и усложняют средства автоматического регулирования параметров.

Применение ИС (см. рис. 2.10, *а*) с индивидуальным вторичным прибором для каждого первичного измерительного преобразователя на современных химико-технологических процессах, где требуется измерение нескольких сотен параметров, сопряжено с существенным увеличением площади щитов контроля и управления и с затруднениями оператора, связанными с необходимостью восприятия большого потока информации в ограниченный отрезок времени. Из-за физиологических ограничений даже весьма тренированный оператор не может должным образом переработать и

использовать полученную такими ИС информацию. Поэтому часто этим занимаются одновременно несколько операторов.

Рост мощностей технологических установок, значительное увеличение в связи с этим числа измеряемых параметров, развитие цифровой техники обработки информации и переход к оптимизации процессов путем применения АСУТП определили новые тенденции развития ИС, применение на технологических процессах наряду с ИС и системами автоматического контроля систем технической диагностики и систем распознавания образов, объединенных понятием «информационно-измерительные системы» (ИИС).

В области измерительной техники, связанной с ИИС, кроме приведенных в § 2.7 используются следующие понятия.

Измерительно-вычислительная система (ИВС) — это ИИС, в состав которой входит программно-управляемое цифровое вычислительное устройство (микропроцессор, микро- и миниЭВМ и т. п.).

Измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) — это универсальное ядро ИВС, включающее все средства цифровой обработки, хранения, регистрации и отображения измерительной информации, кроме первичных измерительных преобразователей.

При измерении электрических величин технические средства ИВС и ИВК могут совпадать, так как практически отсутствует необходимость первичного преобразования информации.

Основная концепция ИИС, состоящая в системной организации местной автоматической работы средств получения, обработки и передачи измерительной информации, была сформулирована в начале 60-х годов в большой степени под влиянием развивающейся цифровой вычислительной техники. Тогда же были созданы ИИС первого поколения, характеризующиеся централизованным циклическим получением информации с обработкой ее с помощью входящих в ИИС специализированных вычислительных устройств. Элементной базой этих ИИС служила дискретно-полупроводниковая техника.

В технологических процессах ИИС первого поколения использовались в виде так называемых систем централизованного контроля. Эти ИИС не получили широкого применения на химико-технологических процессах из-за табличной формы представления измерительной информации, затрудняющей определение предыстории и тенденции хода процесса, а также из-за дублирования функций щитовой системы измерений и управления, используемой на процессе.

Второе поколение ИИС (70-е годы) характеризуется адресным сбором информации, обработкой ее с помощью ЭВМ, входящей в состав ИИС, и использованием в качестве элементной базы микроэлектронных схем малой и средней степени интеграции.

Третье поколение ИИС, развивающееся в настоящее время, характеризуется использованием в их составе больших интегральных микросхем, микропроцессоров, микропроцессорных комплектов и микроЭВМ, что позволяет значительно улучшить многие характери-

стики ИИС, и определенной децентрализации процесса сбора, обработки и хранения информации. В этих ИИС за счет микропроцессорных средств выполняется обработка и промежуточное хранение информации в местах, максимально приближенных к месту ее получения, например в рассмотренных измерительных устройствах со встроенными МПС. Центральная ЭВМ выполняет при этом более сложные и срочные задачи. Информационно-измерительные системы второго и третьего поколений в соответствии с приведенным выше определением представляют собой ИВС.

В настоящее время промышленностью выпускается несколько разновидностей ИВК, к которым для создания ИВС достаточно подключить соответствующие измерительные устройства.

При автоматизации технологических процессов, когда задачи измерения технологических параметров решаются в неразрывной связи с задачами регулирования и управления, ИВС создаются в рамках АСУТП на базе управляющих вычислительных машин (УВМ) или управляющих вычислительных комплексов (УВК), входящих в состав АСУТП. Организация последней по своей идеологии аналогична организации ИВК для ИИС третьего поколения.

Широкое применение в современных ИВС и УВК микропроцессоров, мини- и микроЭВМ, построенных по магистрально-модульной структуре, обеспечивает простоту наращивания аппаратных средств и возможность изменения решаемых задач ИВС или УВК путем программирования. Это определяет тот факт, что все разновидности ИИС (см. § 2.7), а именно измерительных систем сбора и обработки информации, систем автоматического контроля, технической диагностики и распознавания технических образов, имеют по существу одинаковую структуру, которая в обобщенном виде показана на рис. 14.6.

Первичная измерительная информация, например о параметрах химико-технологического процесса (объекта измерений ОИ), вырабатывается первичными измерительными преобразователями (ПИП). Сигналы ПИП унифицируются и преобразуются по форме и виду энергии (например, пневматические преобразуются в электрические) в блоке аналоговых промежуточных преобразователей (БАПП). Унифицированные аналоговые электрические сигналы в блоке аналого-цифровых преобразователей БАЦП преобразуются в код и поступают в цифровое устройство ЦУ, которым в современных ИВС служат мини- или микроЭВМ. В частных случаях в качестве цифровых устройств используются микропроцессоры, специализированные вычислительные устройства. В качестве устройств вывода в ИВС используются дисплеи, цифровые индикаторы, сигнализаторы, накопители на магнитных лентах или и т. п.

Блок цифроаналоговых преобразователей (см. приложение 1) (ЦАП) служит для формирования компенсирующих воздействий в процессе преобразования измеряемых величин. Все функциональные блоки ИВС могут соединяться между собой через стандартные интерфейсные устройства (ИФУ), а управление ИВС осуществляет -

ся устройством управления (УУ). В частных случаях реализации некоторые из названных блоков ИВС могут отсутствовать. Например, если в ИВС используются рассмотренные выше измерительные устройства, имеющие выходной сигнал в виде кода, отпадает необходимость включения в ИВС блоков БАПП и БАЦП.

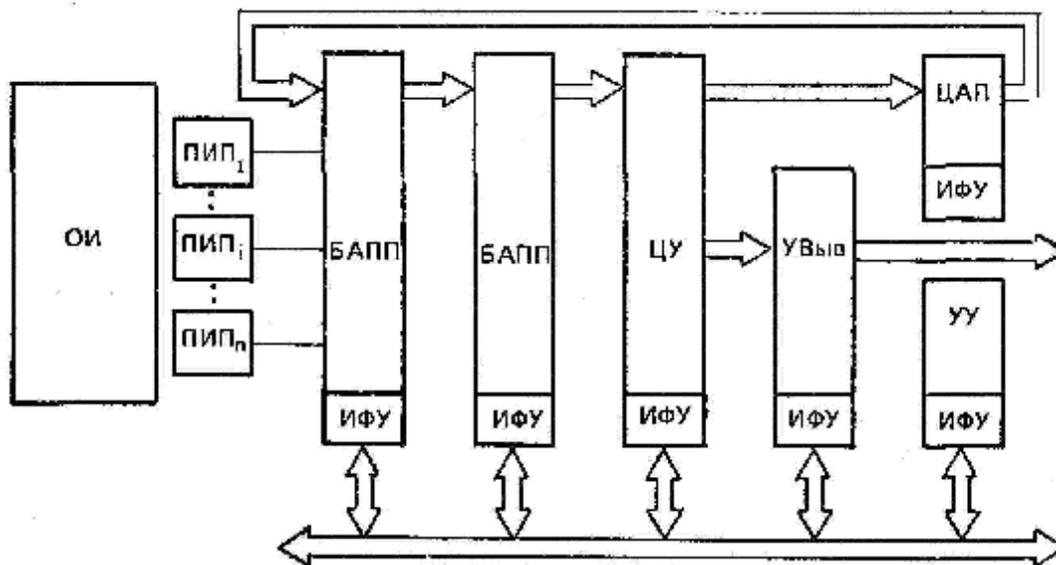


Рис. 14.6. Структурная схема информационно-вычислительной системы

При автоматизации химико-технологических процессов ИВС выполняют функции измерения, контроля и технической диагностики, используя измерительную информацию, поступающую от одних и тех же ПИП, а названные функции реализуются ИВК. программными средствами.

Одной из основных функций ИВС является сбор и обработка измерительной информации. При этом ИВС обеспечивают выполнение как прямых, так и косвенных измерений, в том числе расчет технико-экономических показателей процесса. В табл. 14.2 приведены примеры использования ИВС для выполнения косвенных и совокупных измерений.

Полученную с помощью ИВС информацию принято разделять на оперативную, статистическую и отчетную.

Оперативной называют информацию, используемую для контроля и управления технологическим процессом. Ее важной частью является информация о технико-экономических параметрах.

Статистической называют информацию, получаемую на основе многократных измерений и позволяющую судить о качестве технологического процесса на протяжении длительного времени (несколько часов, дней, месяцев).

Отчетной называют информацию, содержащую сведения о количестве, качестве и ассортименте сырья, промежуточных и конечных продуктов технологического процесса.

Таблица 14.2

Косвенные и совокупные измерения, осуществляемые на химико-технологических процессах с помощью ИВС

Параметр	Измеряемые параметры	Функция	Информация, сохраняемая в памяти ИВС
Массовый расход газа (принципом переменного перепада давлений на сужающем устройстве)	$\Delta P, P_p, T_p, \rho_n$	$G = k \sqrt{\rho_n \frac{P_p}{T_p} \Delta P}$	Статические характеристики первичных измерительных преобразователей измеряемых параметров и статические характеристики сужающего устройства
Массовый расход газа или жидкости (принципом переменного перепада давления на сужающем устройстве)	$\Delta P, \rho_p$	$G = k \sqrt{\rho \Delta P_p}$	То же
Масса (турбинным счетчиком)	n, ρ_p, η_p	$m = f(n, \rho_p, \eta_p)$	Статические характеристики первичных измерительных преобразователей. Функции влияния
Коэффициент полезного действия нагревательной печи	G_c, G_T, t_1, t_2	$\eta = \frac{G_c (c_{p2} t_2 - c_{p1} t_1)}{G_T q}$	Статические характеристики первичных измерительных преобразователей. Значения c_{p2}, c_{p1}, q
Состав многокомпонентных смесей (несколькими анализаторами)	n физико-химических свойств	См. гл. 13	Статические характеристики анализаторов. Коэффициенты системы уравнений
Функция жесткости (в деструктивных процессах)	t, Q	$W = t\tau^a = t(V/Q)^a$	Статические характеристики первичных преобразователей. Значения V и a
Расход тепловой энергии потока жидкости	G, t_2, t_1	$\theta = G c_{ж} (t_2 - t_1)$	Статические характеристики первичных измерительных преобразователей. Значение $c_{ж}$

Вторым важным направлением использования ИВС, в настоящее время интенсивно развивающимся, является техническая диагностика, дающая информацию о неисправностях и повреждениях оборудования, на основании которой решается задача отыскания места повреждений и установление причин этих повреждений и неисправностей. Задача технической диагностики решается с использованием контрольных карт процесса, оценок переменных состояний и параметров моделей процесса, методов распознавания технических образов, информационных графов.

Обозначения к табл. 14.2:

ΔP — перепад давления на сужающем устройстве;

P_p и T_p — абсолютные давление и температура газового потока;

ρ_n — плотность газа в нормальных условиях;

ρ_p — плотность газа в рабочих условиях;

n — число оборотов турбинки;

η_p — динамическая вязкость в рабочих условиях;

G_C и G_T — массовые расходы сырья и топлива;

t_1 и t_2 — температуры сырья на выходе и входе в печи или потребителя тепловой энергии;

q — низшая массовая теплота сгорания топлива;

c_{p2} и c_{p1} — теплоемкости сырья при постоянном давлении на выходе и входе печи;

t — характерная температура деструктивного процесса;

τ — время контакта;

Q — средний объемный расход;

V — объем реактора;

a — постоянная величина;

$c_{ж}$ — теплоемкость жидкости.

ГЛАВА 15 МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

§ 15.1. Общие сведения

Под метрологическим обеспечением понимают установление и применение научных организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и точности измерений.

Понятие «метрологическое обеспечение» неразрывно связано с понятием «метрологическая служба».

Метрологическая служба СССР представляет собой одно из звеньев государственного управления, основными задачами которого являются осуществление комплекса мероприятий по метрологическому обеспечению деятельности предприятий и организаций, обеспечение единства измерений и требуемой точности измерений, повышение эффективности производства и качества выпускаемой продукции.

Метрологическая служба СССР подразделяется на государственную и ведомственную.

Руководство деятельностью метрологической службы СССР и ее координацию осуществляет Государственный комитет СССР по стандартам (Госстандарт).

В состав государственной метрологической службы СССР входят научно-исследовательские метрологические институты с центрами эталонов, стандартных образцов, стандартных и справочных данных, 15 управлений уполномоченных Госстандарта СССР при Советах Министров союзных республик с республиканскими центрами метрологии и стандартизации, лаборатории государственного надзора за внедрением и соблюдением стандартов и состоянием измерительной техники, которые имеются во всех областных центрах страны, и межрайонные отделения этих лабораторий.

Ведомственные метрологические службы, создаваемые министерствами и ведомствами, действуют под руководством Государственной метрологической службы. Они служат для метрологического обеспечения отдельных отраслей хозяйства.

Научно-правовой основой метрологического обеспечения является *государственная система обеспечения единства измерений* (ГСИ), представляющая собой комплекс государственных стандартов и других нормативно-технических документов.

Для многих практически важных измерений, в том числе и для подавляющего большинства технологических измерений, единство измерений обеспечивается единообразием средств измерений.

Под *единообразием средств измерений* понимают такое состояние измерений, когда они проградуированы в узаконенных единицах, а их метрологические свойства соответствуют нормам. Единообразие средств измерений обеспечивается путем их поверки.

Проверкой средств измерений называют определение метрологическими органами погрешности средств измерений и установление их пригодности к применению. Используется также понятие *поверки средств измерений*, под которой понимают операции, проводимые с целью получения информации о средствах измерений вне связи с выявлением достоверности показаний.

Поверки средств измерений, осуществляемые Государственными и ведомственными метрологическими службами, называют соответственно *государственными* и *ведомственными*.

Государственной поверке подвергаются: средства измерений, применяемые государственными и ведомственными метрологическими службами; средства измерений, используемые для выполнения товарно-учетных и торговых операций; средства измерений, связанные с охраной здоровья, труда и противопожарной профилактикой; средства измерений, используемые для регистрации спортивных национальных и международных рекордов.

Все остальные средства измерений, в том числе средства технологических измерений, подлежат обязательной ведомственной поверке.

При положительном исходе поверки средства измерений на него наносят поверочное клеймо — знак, удостоверяющий факт поверки и признания средства измерений годным к применению.

§ 15.2. Передача размера единиц от эталона к образцовым и рабочим средствам измерений

Основой обеспечения единства измерений является воспроизведение, хранение и передача размера установленных единиц физических величин.

Названные технологические процедуры осуществляются с помощью эталонов и образцовых приборов (см. § 2.1).

Назначение эталонов — воспроизведение и хранение единиц физических величин. Эталоны хранятся и используются в метрологических институтах и ведущих организациях Государственной метрологической службы.

Передача размеров единиц от эталонов к рабочим средствам измерений осуществляется с помощью образцовых средств измерений. Порядок этой передачи устанавливается поверочными схемами.

Поверочная схема — утвержденный в установленном порядке документ, устанавливающий средства, методы и точность передачи

размера единицы от эталона или исходного образцового средства измерений рабочим средствам измерений.

Различают государственные, ведомственные и локальные поверочные схемы.

Государственные поверочные схемы разрабатываются главными центрами государственных эталонов и обобщаются в виде государственных стандартов на общесоюзные поверочные схемы [33]. Они служат основанием для составления ведомственных и локальных поверочных схем.

Ведомственные поверочные схемы разрабатываются ведомствен-

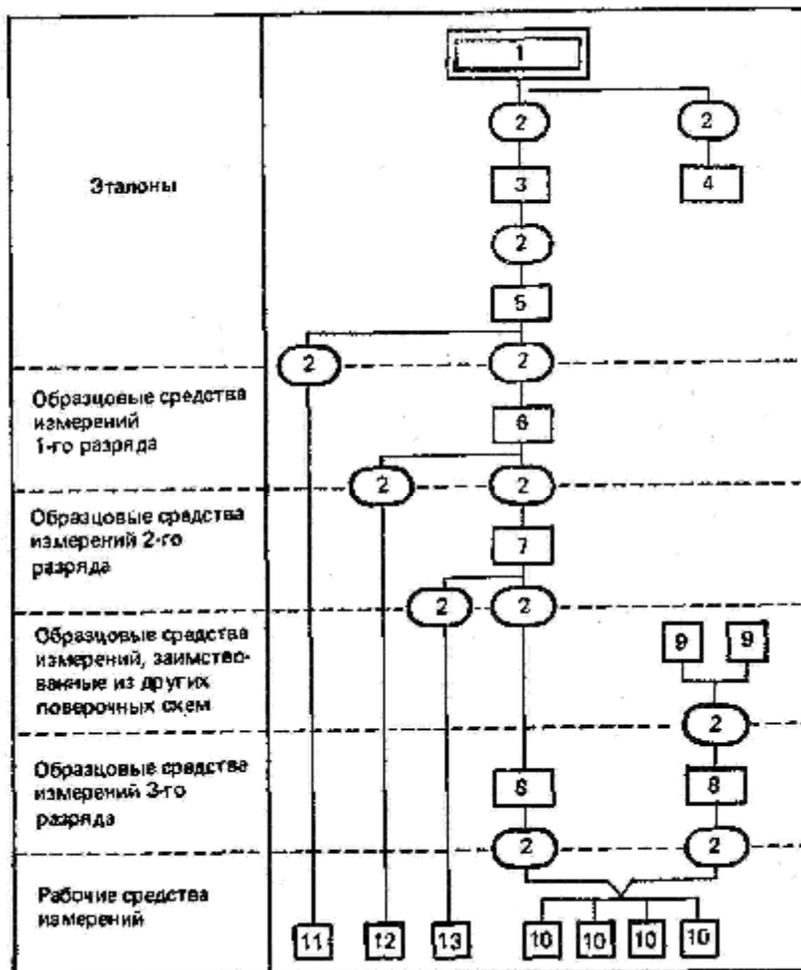


Рис. 15.1. Структура поверочной схемы:

1 — государственный эталон; 2 — метод передачи размеров; 3 — эталон-копия; 4 — эталон-свидетель; 5 — рабочий эталон; 6—9 — образцовые средства намерений; 10 — рабочие средства измерений наивысшей точности; 12 — рабочие средства измерений высшей точности; 13 — рабочие средства измерений высокой точности

ными поверочными метрологическими службами и распространяются на средства измерений, поверяемые внутри ведомства.

Локальные поверочные схемы разрабатываются метрологическими службами предприятий и распространяются на средства измерений, поверяемые этой метрологической службой. Локальные поверочные схемы составляются при наличии более двух ступеней передачи размера единицы физической величины.

Поверочные схемы состоят из чертежа (рис. 15.1) и текстовой части. У локальных поверочных схем текстовая часть может отсутствовать.

§ 15.3. Регулировка, градуировка и поверка средств измерений

Техническое единообразие средств измерений достигается их регулировкой, градуировкой и поверкой.

Регулировка средств измерений — это совокупность операций, имеющих целью уменьшение основной погрешности до предельно допустимого значения путем уменьшения систематической составляющей погрешности средств измерений.

Необходимость в регулировке возникает из-за несовершенства технологии изготовления средств измерений. Для выполнения регулировки в средствах измерений предусматривают элементы или узлы, изменение параметров которых обеспечивает уменьшение аддитивной или мультипликативной погрешности. Для уменьшения аддитивной погрешности в составе средств измерений предусматривается узел регулировки нуля, а для уменьшения мультипликативной погрешности — узел регулировки чувствительности.

При регулировке выбирают несколько точек (значений измеряемой величины) в пределах диапазона измерений, в которых систематическая погрешность путем регулировки сводится к нулю. Эти точки называют точками регулировки.

На практике в качестве точек регулировки принимают начальное и конечное, среднее и конечное или начальное, среднее и конечное значения измеряемой величины в диапазоне измерений.

Градуировка (тарировка) средств измерений — это определение градуировочной характеристики средств измерений.

Применительно к измерительным приборам под градуировкой понимают процесс нанесения отметок на шкалы их или определение значений измеряемой величины, соответствующих уже нанесенным на шкалы отметкам, с целью составления градуировочных характеристик или таблиц.

При этом различают: градуировку типовых шкал, индивидуальную градуировку шкалы и градуировку условной шкалы.

Градуировка типовых (печатных) шкал применяется для подавляющего большинства рабочих и многих образцовых измерительных приборов. Шкалы этих приборов изготавливаются заранее в соответствии с уравнением номинальной статической характеристики (см.

§ 2.5). При регулировке прибора регулировочным узлам придают значения, при которых систематическая погрешность в точках регулировки равна нулю.

Индивидуальная градуировка шкал осуществляется в тех случаях, когда статическая характеристика нелинейна или близка к линейной, но систематическая погрешность изменяется в диапазоне измерений от прибора к прибору так, что регулировкой не удастся уменьшить основную погрешность до пределов ее допустимых значений.

В процессе индивидуальной градуировки на шкалу прибора наносятся отметки, соответствующие положениям указателя при нескольких наперед заданных или принятых значениях измеряемой величины, которые последовательно подаются к прибору.

Градуировка условной шкалы состоит в определении с помощью образцовых средств измерений значений измеряемой величины, соответствующих нескольким наперед заданным или выбранным отметкам этой шкалы. Получаемая при такой градуировке зависимость представляется графиком или таблицей. Проверка средств измерений, т. е. определение их погрешности, выполняется при условиях, которые оговорены в названной нормативной документации. Причем степень необходимости ограничения условий поверки определяется зависимостью показаний средства измерений от этих условий.

Общим при этом является требование, в соответствии с которым основная погрешность средства измерений должна определяться в процессе поверки при нормальных условиях.

Проверка обычно осуществляется на специальных или собранных из соответствующих средств измерений и вспомогательных устройств поверочных установках.

В общем случае *поверочной установкой* называют измерительную установку, укомплектованную образцовыми средствами измерений и предназначенную для поверки других средств измерений.

Узловым вопросом при поверке является выбор соотношения между допустимыми погрешностями образцового и поверяемого средств измерений. В общем случае это соотношение выбирают в интервале от 1:2 до 1:10. Чаще других используются соотношения 1:3 или 1:5. Соотношение 1:3 применяется в тех случаях, когда при поверке вводят поправки к показаниям образцового средства измерений, а соотношение 1:5 — когда эти поправки не вводят. Очень важным при этом является соотношение диапазонов измерений образцового и поверяемого средств измерений. Верхний предел измерений образцового средства измерений должен быть равен или незначительно превышать верхний предел измерений поверяемого средства измерений.

Необходимая точность образцовых средств измерений, а иногда и их типы регламентируются нормативными документами по поверке конкретных средств измерений. Сама операция поверки средств

измерений по существу представляет собой передачу размера единицы от образцовых к рабочим средствам измерений. Та же операция (рис. 15.1) осуществляется при передаче размера единицы от эталонов к образцовым средствам измерений.

Для средств технологических измерений применяются следующие методы поверки: непосредственное сличение средства измерения с образцовым средством измерений того же вида; прямое измерение поверяемым средством измерений величины, воспроизводимой образцовой мерой.



Рис. 15.2. Способы поверки измерительных приборов

величин, воспроизводимых образцовыми мерами, значения последних выбирают равными соответствующим (чаще всего оцифрованным) отметкам шкалы измерительного прибора.

При поверке измерительного прибора методом непосредственного сличения с образцовым на вход этих измерительных приборов подается поочередно несколько значений

измеряемой величины (обычно соответствующих оцифрованным отметкам) и определяют разность показаний образцового и поверяемого прибора. Определение этой разности осуществляется одним из двух способов (рис. 15.2).

По первому способу путем изменения измеряемой величины устанавливают ее значение, соответствующее поверяемой отметке на шкале образцового прибора ОП (рис. 15.2, а), а по шкале поверяемого прибора определяют погрешность Δ .

По второму способу значение измеряемой величины устанавливают по шкале поверяемого прибора ПП (рис. 15.2, б), а погрешность Δ определяют по шкале образцового прибора ОП.

Первый способ удобен при автоматизации поверочных работ. Он позволяет с помощью одного образцового прибора и одного устройства, воспроизводящего измеряемую величину, поверять сразу несколько приборов. Второй способ позволяет точнее, чем первый, определять погрешность, так как шкалы образцового прибора имеют большее число делений, чем шкалы поверяемого. Такое преимущество данного способа проявляется только при тщательной установке указателя поверяемого прибора на оцифрованные отметки шкалы.

Как при поверке измерительных приборов методом прямого измерения величин, воспроизводимых мерами, так и при поверке методом непосредственного сличения с образцовым прибором наибольшую, полученную во всем диапазоне измерения погрешность принимают за основную погрешность поверяемого измерительного прибора.

Для измерительных приборов, у которых нормировано значение вариации, при поверке показания снимают минимум дважды: при плавном возрастании измеряемой величины и при ее плавном убывании. При этом устанавливаются такие значения измеряемой величины, при которых указатель подходит к соответствующей отметке шкалы с одной или с другой стороны, не переходя ее. За значение вариации принимают наибольшее значение из полученных для всех поверяемых отметок в диапазоне измерений.

Поверка измерительных преобразователей осуществляется обычно теми же методами, что и поверка измерительных приборов при пяти и более заранее принятых значениях измеряемой величины, равномерно распределенных по диапазону измерений.

Воспроизведение или измерение входной величины осуществляется соответственно образцовой мерой или образцовым измерительным прибором, а для измерения выходного сигнала также используют образцовый измерительный прибор. Результат поверки представляется погрешностью и вариацией по входу или по выходу.

Для сложных средств измерений, состоящих из нескольких взаимосвязанных узлов, и для измерительных систем применяют поэлементную или комплектную поверку.

Комплектной называют поверку, при которой средство измерений поверяется в целом — в полном комплекте.

Поэлементной называют поверку, при которой определяется погрешность отдельных частей поверяемого средства измерений, а его общая погрешность определяется по найденным погрешностям этих частей.

На практике поэлементную поверку нередко проводят в сочетании с комплектной.

Результаты поверки для многих средств измерений представляются в виде протокола, который является основным документом, имеющим юридическое значение.

§ 15.4. Метрологическое обеспечение средств измерений давления

Основу метрологического обеспечения средств измерений давления составляет группа государственных эталонов, в состав которой входят один первичный и пять специальных эталонов.

Государственный первичный эталон единицы давления представляет собой комплекс средств измерений, включающий группу, из пяти поршневых приборов переменного состава, набор гирь и специальную аппаратуру для создания и поддержания гидростатиче-

ского давления, создаваемого весом поршня и нагружающих его гирь.

В качестве образцовых средств измерений давления используются жидкостные компенсационные, грузопоршневые и деформационные приборы.

Жидкостные компенсационные приборы. К этим приборам относится универсальный жидкостной мановакуумметр (прибор Петрова).

Прибор этого типа предназначен для поверки дифманометров-расходомеров переменного перепада давления, вакуумметров, тягомеров и других средств измерений давления и разрежения. Прибор (рис. 15.3) содержит две пары сообщающихся сосудов. Одна из них предназначена для работы на «воде», другая — на «ртути». Каждая пара состоит из металлического бачка 5 (16) и прозрачного стакана 4 (13).

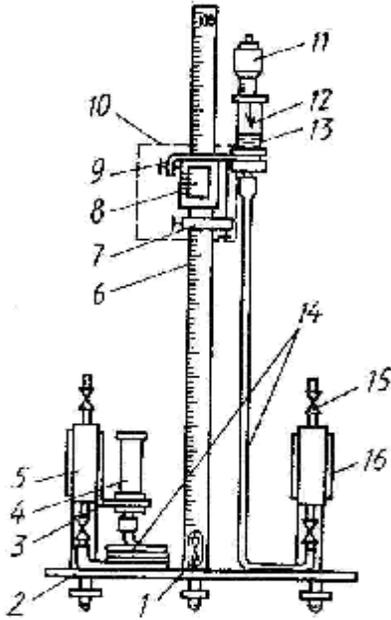


Рис. 15.3. Схема универсального жидкостного мановакуумметра

В нерабочем положении при измерении давления каждый бачок устанавливается в вертикальное положение на стойке, укрепленной на плате 2. При измерении прибором вакуума каждый из бачков с помощью кронштейна, расположенного на бачке, может устанавливаться на линейке 6. Под стойкой левого бачка укреплен кронштейн 3, служащий для закрепления в нем одного из прозрачных стаканов. Линейка 6 имеет цилиндрическое трубчатое сечение, внутри нее расположен отвес 1, видимый через отверстие внизу линейки. На линейке нанесена шкала с миллиметровыми делениями. Вдоль линейки перемещается каретка 10, которая состоит из двух направляющих. На верхней направляющей 8 каретки 10 расположен нониус с точностью отсчета 0,1 мм. Нижняя направляющая 7 каретки 10 служит для плавного перемещения каретки до заданной отметки шкалы линейки. В зависимости от диапазона измерений выбирают пару сосудов, заполненных водой или ртутью и сообщающихся между собой гибким шлангом 14. Перед измерением прибор устанавливают по отвесу и выставляется нуль прибора. Если измеряется перепад давлений, то прозрачный бачок укрепляют на кронштейне 9 каретки 10, как показано на рис. 15.3. При измерении перепада давления верхний штуцер вентиля 15 соединяют с плюсовой камерой поверяемого прибора. Поверка осуществляется следующим образом. Каретку 10 устанавливают на отметке шкалы, соответствующей расчетному значению перепада — поверяемой отметке шкалы прибора. Воздушным прессом или от компрессора подается дав-

ление, при котором стрелка прибора устанавливается на поверяемую отметку. Открывают вентиль 15 бачка 16 и точно устанавливают стрелку на поверяемую отметку. Если показания прибора в поверяемой отметке имеют погрешность, то уровень рабочей жидкости в прозрачном бачке не совпадает с концом иглы 12 (выше или ниже его). Погрешность прибора в поверяемой отметке определяют путем вращения микрометрического винта 11 до тех пор, пока конец иглы не коснется зеркала жидкости.

Абсолютная погрешность прибора в поверяемой отметке считается со шкалы микрометрического винта.

При измерении разрежения металлический бачок укрепляется на верхней секции линейки, а прозрачный бачок устанавливают на кронштейне 9 каретки 10, которую помещают на нулевую отметку. Нулевая отметка при измерении разрежения находится на отметке 760 мм шкалы линейки. Относительная погрешность показаний универсального жидкостного мановакуумметра при измерении давления и разрежения в диапазоне 150—1000 мм вод. ст. и в диапазоне 75—1000 мм рт. ст. составляет $\pm 0,3\%$. В диапазоне 0—150 мм вод. ст. абсолютная погрешность не превышает $\pm 0,5$ мм вод. ст., а в диапазоне 0—75 мм рт. ст. — 0,25 мм рт. ст.

Грузопоршневые средства измерений давления. Принцип действия грузопоршневых средств измерений давления основан на уравнивании усилия, развиваемого измеряемым давлением на неуплотненном поршне, силой тяжести груза, нагружающего поршень. Неуплотненный поршень представляет собой поршень правильной цилиндрической формы, расположенный в цилиндре. Между стенками цилиндра и поршня существует равномерный и очень малый зазор (1—5 мкм), заполненный рабочей жидкостью (трансформаторным, касторовым или приборным маслом). В результате поршень находится во взвешенном состоянии и может оказывать на жидкость давление, обусловленное весом поршня и нагружающего его груза. Совокупность поршня и цилиндра образует поршневую систему, называемую «колонкой», которая является неотъемлемым элементом всех поршневых средств измерений. Поршневые средства измерений обладают высокой точностью благодаря идеальной цилиндрической форме поршня и цилиндра.

По форме используемого поршня различают поршневые средства измерений давления с простым поршнем, дифференциальным поршнем и с поршневым мультипликатором.

На рис. 15.4, а показана схема установки с грузопоршневым манометром, оснащенный простым поршнем. Установка включает грузопоршневой манометр 1 и гидравлический пресс 11. Грузопоршневой манометр представляет собой сосуд цилиндрической формы 1, заполненный рабочей жидкостью. Во внутренней полости цилиндра расположен поршень 2 с грузоприемной тарелкой 6.

Гидропресс представляет собой поршень 11, имеющий манжетное уплотнение. Внутренняя полость пресса сообщается с грузопоршневым манометром 1 и поверяемым прибором 9 через каналы,

которые перекрываются вентилями 7 и 10. Для заполнения гидравлической системы пресса рабочей жидкостью предусмотрен бачок 8 с запорным вентилем.

При измерении давления P , создаваемого гидропрессом, грузоприемную тарелку 6 нагружают грузами 5 до тех пор, пока поршень 2 не придет в состояние равновесия.

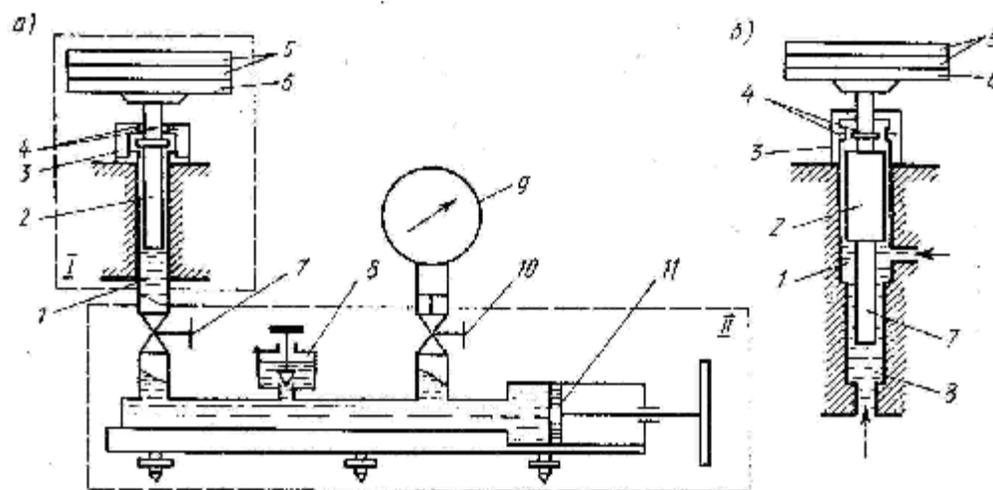


Рис. 15.4. Схема грузопоршневого манометра

О достижении равновесия судят по совпадению рисок 4 на поршне и ограничителе хода 3 поршня. В состоянии равновесия поршня справедливо равенство

$$P = \frac{m_{\text{п}} + m_{\text{Г}}}{F_{\text{пр}}} (1 - \rho_{\text{н}} / \rho_{\text{Г}}) g, \quad (15.1)$$

где $m_{\text{п}}$, $m_{\text{Г}}$ — масса поршня и грузов; $\rho_{\text{н}}$, $\rho_{\text{Г}}$ — плотность воздуха и материала груза; $F_{\text{пр}}$ — приведенная площадь поршня.

На практике $F_{\text{пр}}$ определяется экспериментально и является основным метрологическим параметром грузопоршневых манометров. В современных грузопоршневых манометрах приведенная площадь поршня — порядка $0,5 \text{ см}^2$. Зависимость (15.1) справедлива для поршневой системы в случае отсутствия сил нежидкостного трения. Для обеспечения этого условия в процессе измерения поршню 2 сообщают вращательное движение. Классы точности грузопоршневых манометров с простым поршнем 0,02; 0,05; 0,2. Для измерения давления до $5 \times 10^8 \text{ Па}$ без увеличения массы грузов необходимо уменьшать приведенную площадь поршня. Однако это уменьшение ограничивается потерей жесткости поршня. Применение дифференциального поршня позволяет достигать больших давлений без увеличения массы грузов. Кроме отмеченного преимущества, достигаемого применением дифференциального поршня, следует отметить и возможность измерения разрежения.

Обычно грузопоршневые манометры оснащаются дифференциальными поршнями, приведенная площадь которых не менее 20 см^2 . На рис. 15.4, б показан грузопоршневой манометр с дифференциальным поршнем. При измерении избыточного давления цилиндрическая камера 1 сообщается с объектом измерения, а цилиндрическая камера 8 герметизируется.

При измерении разрежения цилиндрическая камера 8 соединяется с объектом измерения, а в камеру 1 подается уравнивающее давление, создаваемое дополнительной поршневой системой. Назначение остальных элементов дифференциальной поршневой системы аналогично назначению соответствующих элементов пробы поршневой системы.

На базе дифференциального поршня разработан грузопоршневой мановакуумметр класса точности 0,05.

Для поверки средств измерений давления с верхними пределами измерений 600—2000 МПа применяются образцовые грузопоршневые манометры с измерительным мультипликатором (умножителем) — устройством, позволяющим в несколько десятков раз увеличить усилия, развиваемые сменными грузами.

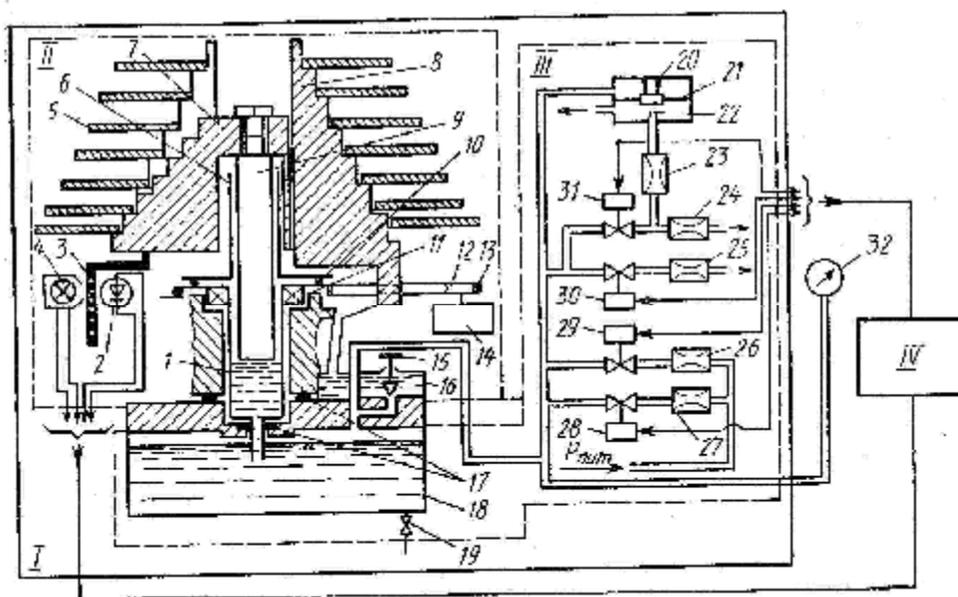


Рис. 15.5. Схема автоматического задатчика давления

Классы точности образцовых грузопоршневых манометров с измерительным мультипликатором 0,05—0,2 [13].

Разновидностью грузопоршневых манометров является автоматический задатчик давления (АЗД) (рис. 15.5), состоящий из двух блоков: задатчика давления I и пульта управления IV. Задатчик

давления включает автоматизированный грузопоршневой манометр *II* и пневмогидравлическую схему *III*.

Грузопоршневой манометр представляет собой поршень 9, перемещающийся в цилиндре, состоящем из двух частей: нижней 1 и верхней 6. Между нижней и верхней частями цилиндра имеется уплотнительное кольцо 10, обеспечивающее уплотнение поршневой системы. Для устранения сухого трения между поршнем и цилиндром нижний цилиндр 1 приводится во вращение пасиком 13, связанным с роликом 12, укрепленным на оси электродвигателя 14. Для обеспечения вращения цилиндра предусмотрен шарикоподшипник 11. К поршню 9 крепится ступенчатая втулка 7, имеющая лепестки, которые входят в пазы корпуса 8. Грузы 5 устанавливаются на ступеньках корпуса 8. При перемещении поршня вверх грузы со ступенек корпуса 8 нанизываются на ступеньки лепестков втулки 7. В результате давление, создаваемое поршнем на свободную поверхность жидкости, возрастает соответственно увеличению массы грузов на втулке. Для обеспечения дискретного перемещения поршня предусмотрен индикатор 3, прикрепленный к втулке 7, имеющий горизонтальные прорези, и перемещающийся между фотодиодом 2 и источником видимого света 4. При определенных положениях индикатора на фотодиод попадает световой пучок, который преобразуется в электрический сигнал, подаваемый на пульт управления *IV*.

Преобразование гидравлического давления, создаваемого грузопоршневым манометром *II*, в давление сжатого воздуха осуществляется пневмогидравлической схемой, включающей разделительный бачок 18, пневмоповторитель 20, систему управляемых клапанов 28—31 и систему регулируемых дросселей 23—27. Конструкция бачка такова, что уровень рабочей жидкости в нем выше нижнего края цилиндра 1. Это исключает возможность попадания воздуха под поршень. Рабочая жидкость заливается в бачок через воронку 16 с запорным винтом 15, а сливается с помощью запорного винта 19. Жидкость, появляющаяся в результате утечки через зазоры между поршнем и цилиндром, через канал в стенке цилиндра и полиэтиленовую трубку стекает в воронку 16. Воздух в верхнюю часть бачка и к поверяемому прибору 32 (при необходимости можно поверять сразу два прибора) поступает от сети пневмопитания через клапан 29 или 28 (при повышенной скорости поверки). Сброс воздуха в атмосферу при обратном ходе задатчика осуществляется через клапан 31 или 30 (при повышенной скорости поверки). Скорость нарастания и сброса давления регулируется дросселями 24—27. Для ускорения сброса при задании нижних ступеней давления параллельно дросселю 24 и клапану 31 установлен дроссель 23, который сбрасывает воздух в атмосферу через повторитель 20. Пружина повторителя отрегулирована так, что мембрана 21 открывает сопло 22 при давлении около 50 кПа, когда становится заметной задержка времени задания очередного значения давления при обратном ходе задатчика.

На пульте управления *IV* расположены органы управления АЗД и логическая схема, в которую включены клапаны 28—31 и фотодиод 2. АЗД позволяет работать в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах. Класс точности АЗД с верхним пределом измерений 0,1; 0,16; 0,25 МПа составляет 0,05. Дискретность давления для АЗД с пределом измерений 0,1 и 0,16 МПа составляет 10 кПа, а с верхним пределом 0,25 МПа — 20 кПа.

Образцовые деформационные манометры и вакуумметры. Принцип действия этих приборов аналогичен рабочим манометрам и вакуумметрам, рассмотренным в § 4.4. Отличительным элементом конструкций образцовых приборов является корректор нуля и **ар->етир**. Шкала приборов круговая, имеет 100 или 250 условных единиц. Основной особенностью образцового прибора является материал, из которого выполнен упругий чувствительный элемент, а также отношение предела измерений к пределу пропорциональности трубчатой пружины. Это отношение для образцовых приборов лежит в пределах от 3 до 4, в то время как для рабочих приборов оно равно 1,5—2,0.

При проведении измерений образцовым деформационным прибором необходимо руководствоваться данными градуировочной таблицы, указанной в паспорте прибора. Для уменьшения погрешности прибора, вызванной отклонением температуры окружающей среды от 20°C, рекомендуется к показаниям прибора вводить температурную поправку. Верхние пределы измерений образцовых манометров избыточного давления ограничены значениями 0,1—60 МПа. Диапазон измерений образцовых вакуумметров — 0,1—0 МПа. Классы точности образцовых деформационных приборов 0,15; 0,2; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0.

§ 15.5. Метрологическое обеспечение средств измерений температуры

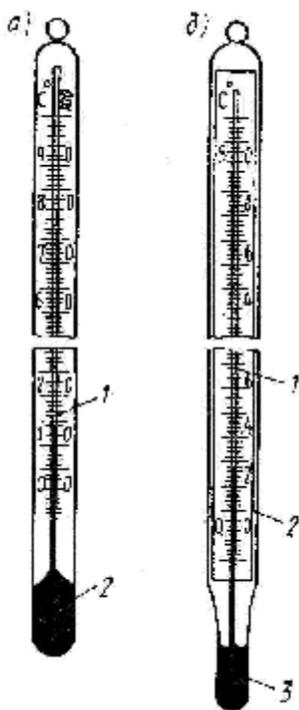
Основу метрологического обеспечения средств измерений температуры в диапазоне 13,81—6300 К составляют две поверочные схемы, в основе которых лежат государственные первичные эталоны единиц температуры — кельвин (К). Принцип действия эталонов основан на воспроизведении реперных точек МПТШ-68. В диапазоне температур от **13,81** до 273,15 К передача размера единицы от эталона осуществляется образцовыми средствами измерений, в состав которых входят платиновые термопреобразователи сопротивления, полупроводниковые термопреобразователи сопротивления, медь-копелевые и медь-константановые термоэлектрические термометры (ТЭТ) и ртутные стеклянные термометры.

Передача размера единицы температуры от эталона в диапазоне 273,15—6300 К осуществляется образцовыми средствами измерений, которые согласно поверочной схеме подразделяют на две группы: *термометры* и *пирометры*. В группу термометров входят:

ртутные стеклянные термометры, платиновые термометры сопротивления, платинородий-платиновые и платинородий-платинородиевые (градуировка ПР30/6) ТЭТ и вольфрамрениевые (градуировка ВР 5/20) ТЭТ, а в группу пирометров — температурные лампы, пирометры полного излучения и визуальные монохроматические пирометры.

Образцовые стеклянные жидкостные термометры. Они предназначены для измерения температуры в диапазоне 240,15—903 К. В качестве термометрической жидкости в этих термометрах используется ртуть.

Образцовые ртутные термометры О выпускаются палочные (рис. 15.6, а) и с вложенной шкалой (рис. 15.6, б).



Палочные термометры представляют собой толстостенный капилляр 1 с внешним диаметром 6—8 мм и внутренним 0,1 мм. Нижняя часть капилляра выполнена в виде резервуара 2 цилиндрической формы, заполненного ртутью, а верхняя часть — заварена, чем обеспечивается герметизация внутренней полости капилляра. Шкала у палочного термометра нанесена непосредственно на внешнюю поверхность капилляра. Отличительной особенностью термометров с вложенной шкалой является то, что капилляр 1, снабженный резервуаром 3 цилиндрической формы, прикрепляется к шкальной пластине 2, и оба они размещены внутри защитной стеклянной оболочки. Доверительные абсолютные погрешности образцовых ртутных термометров 3-го разряда $\pm (0,03—3,0)$ К. Образцовые

Рис. 15.6. Устройство ртутных стеклянных термометров

ртутные термометры выпускаются с ценой деления 0,01; 0,02; 0,05; 0,1 °С.

За действительную температуру термостата термометров (криостата), измеряемую образцовым термометром, принимают среднее арифметическое из его показаний, к которому прибавляют поправку для данной отметки шкалы, взятую из свидетельства, и поправку на выступающий столбик.

Образцовые термопреобразователи сопротивления. Эти термометры изготавливают из платины. Чувствительный элемент образцового термопреобразователя сопротивления представляет собой кварцевый каркас геликоидальной формы с укрепленной спиралью из платиновой проволоки. Для измерения сопротивления чувствительного элемента предусмотрено две пары выводов. Одна пара выводов потенциальная, вторая — токовая. Потенциальные выводы подключаются к измерительному прибору, а токовые — к источнику тока. Образцовые термометры с абсолютной погрешностью $\pm(0,03—0,07)$ К в диапазоне 273—903 К применяют для по-

верки рабочих термопреобразователей сопротивления из благородных металлов, полупроводниковых термометров, жидкостных стеклянных термометров, манометрических термометров и термоэлектрических из благородных металлов. Образцовые термометры с абсолютной погрешностью $\pm(0,01—0,03)\text{К}$ в диапазоне $273—903\text{К}$ применяются только для поверки платиновых термометров сопротивления.

Образцовые термоэлектрические термометры. Образцовые термоэлектрические термометры (ТЭТ) подразделяют на платинородий-платиновые, платинородиевые и вольфрамренивые. Абсолютные погрешности образцовых ТЭТ составляют: для платинородий-платиновых ТЭТ в диапазоне температур $573—1473\text{К}$ — $\pm(0,8—2,0)\text{К}$; для платинородиевых (градуировка ПР 30/6) ТЭТ в диапазоне $1200—2073\text{К}$ — $\pm(1,2—6,0)\text{К}$; для вольфрамрениевых (градуировка ВР 5/20) ТЭТ в диапазоне $1200—2800\text{К}$ — $\pm(2—17)\text{К}$.

Конструкции образцовых и рабочих ТЭТ аналогичны. При проведении поверочных измерений образцовые ТЭТ применяются без защитных чехлов.

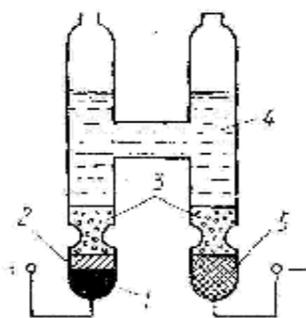
Образцовые температурные лампы. Температурные лампы предназначены для воспроизведения яркостной и цветовой температур. Образцовые температурные лампы с абсолютной погрешностью $\pm(3—15)\text{К}$ предназначены для поверки рабочих монохроматических пирометров и пирометров спектрального отношения в интервалах температур $1100—3100\text{К}$.

Образцовые пирометры полного излучения предназначены для поверки рабочих пирометров полного излучения, диапазон измерения которых $300—2800\text{К}$. Абсолютная погрешность образцовых пирометров полного излучения в диапазоне $300—2800\text{К}$ составляет $\pm(5—15)\text{К}$.

Рассмотренные образцовые средства измерений предназначены для поверки первичных измерительных преобразователей температуры. Метрологическое обеспечение средств измерений, работающих в комплекте с первичными измерительными преобразователями температуры, к числу которых относятся измерительные приборы и нормирующие измерительные преобразователи, базируется на образцовых средствах измерений, заимствованных из других поверочных схем. Эти средства измерений являются электрическими и включают: меры ЭДС, потенциометры и меры электрического сопротивления.

Образцовые меры электродвижущей силы. В качестве меры ЭДС используют нормальные элементы, представляющие собой гальванические элементы, способные воспроизводить ЭДС с высокой точностью. Нормальные элементы (НЭ) изготавливают двух типов: насыщенные и ненасыщенные. Насыщенный НЭ (рис. 15.7) состоит из герметичного стеклянного сосуда Н-образной формы. Положительным электродом 1 служит ртуть, отрицательным электродом 5 — амальгама кадмия. Выводы от электродов, выполнен-

ные из платиновой проволоки, впаяны в нижние концы сосуда. Над ртутью расположен слой пасты 2 из смеси сернокислой ртути и сернокислого кадмия. Паста является деполяризатором. Электролитом 4 служит насыщенный раствор



сернокислого кадмия. Насыщение раствора обеспечивается кристаллами сернокислого кадмия 3. В зависимости от допустимого изменения ЭДС в процентах за год насыщенные НЭ подразделяют на классы 0,0002; 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005. Насыщенный НЭ позволяет пропускать ток не более 1 мкА и обладает чувствительностью к изменению температуры. Среднее значение ЭДС НЭ при 20°C составляет 1,0186 В.

Действительное значение ЭДС насыщенного НЭ

при температурах, отличных от 20°C, определяют

Рис. 15.7. Устройство расчетным путем.

нормального элемента

Ненасыщенные НЭ отличаются от насыщенных

тем, что они заполнены ненасыщенным раствором сернокислого кадмия. ЭДС ненасыщенного НЭ составляет 1,0186—1,0194 В. Класс точности ненасыщенных НЭ 0,002; 0,005; 0,01; 0,02. Основное достоинство ненасыщенных НЭ — способность пропускать ток до 10 мкА и малое изменение ЭДС с изменением температуры.

Образцовые потенциометры постоянного тока. К числу образцовых потенциометров постоянного тока относятся переносные потенциометры класса точности 0,05. Эти потенциометры предназначены для непосредственного измерения ЭДС (напряжения); проверки технических ТЭТ, нормирующих измерительных преобразователей и измерительных приборов, работающих в комплекте с ними; получения плавно регулируемого напряжения постоянного тока. Для выполнения указанных выше функций переносные потенциометры оснащаются узлами (рис. 15.8), основными из которых являются: потенциометр с ручным уравниванием *П*; делитель напряжения *ДН*; переключатель сопротивлений *В1*; переключатель рода работы *В2*; источник питания *ИП* (батарея из нескольких параллельно соединенных сухих элементов). Электрическая схема потенциометра *П* с ручным уравниванием (рис. 15.9) состоит из трех контуров: контроля *I*, компенсации *II* и измерения *III*. Контур контроля *I* включает нормальный элемент *НЭ*, резистор $R_{нэ}$, тумблер *T* в положении *K* (контроль) и нуль-гальванометр *НГ*.

Контур компенсации *II* образован переменным резистором R_6 , источником питания *ИП*, резистором $R_{нэ}$, резисторами $R_1 — R_{48}$ секционированного переключателя *В3* и реохордом R_p . Контур измерения *III* состоит из зажимов *K3* и *K4*, на которые подается измеряемая ЭДС (напряжение), резисторов $R_1 — R_{48}$, секционированного переключателя *В3*, тумблера *T* в положении *И* (измерение) и нуль-гальванометра *НГ*.

Назначение отдельных элементов контуров *I—III* аналогично

назначению соответствующих элементов потенциометра, схема которого представлена на рис. 6.13. Что касается секционированного переключателя $B3$, то он применен в схеме переносного потенциометра с целью расширения пределов измерения. Процедура измерения ЭДС (напряжения) осуществляется в последовательности, рассмотренной для потенциометрической схемы, приведенной на рис. 6.13. Значение измеряемой ЭДС (напряжения) в милливольттах равно сумме показаний шкалы 2 (целые значения) и шкалы 1 (дробные значения).

При измерении ЭДС (напряжения) переносным потенциометром (см. рис. 15.8) переключатель $B2$ должен находиться в положении «Потенциометр», а переключатель $B1$ — на отметке 0. При проверке автоматических потенциометров и потенциометрических милливольтметров переключатель $B2$ находится в положении «Проверка», а переключатель $B1$ ставится на отметку 0 (при проверке потенциометров) или на отметку, соответствующую указанной на шкале проверяемого милливольтметра $R_{вн}$. В процессе проверки на зажимы $K1, K2$ переносного потенциометра с $ДН$ подается напряжение, составляющее от -5 до 100 мВ, которое одновременно подается и на зажимы $K3, K4$ потенциометра $П$. В результате переносной потенциометр превращается в меру напряжения.

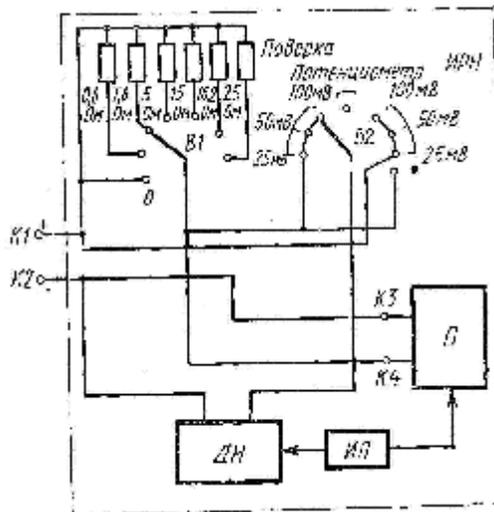


Рис. 15.8. Схема переносного потенциометра

При проверке автоматических

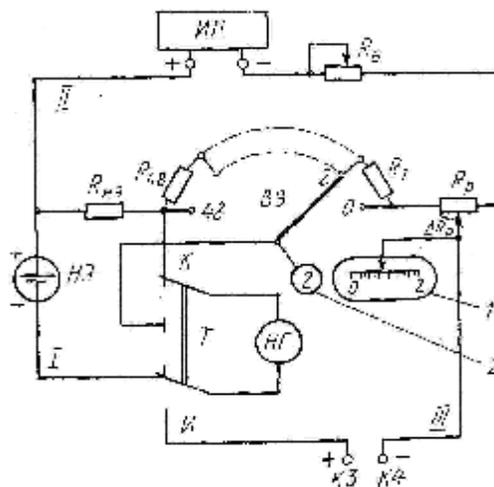


Рис. 15.9. Схема потенциометра с ручным уравновешиванием

При работе в режиме источника регулируемого напряжения переключатель *B2* находится в положении *ИРН*, а переключатель *B1* — на отметке 0. Переносной потенциометр может быть использован и для проверки сопротивления, имитирующего сопротивление линии. Для выполнения этого рода работы переключатель *B2* должен находиться на отметке точка (.).

Образцовые меры электрического сопротивления. В качестве мер электрического сопротивления применяют измерительные катушки сопротивлений и магазины сопротивлений классов точности 0,01—0,05. Они широко используются при проверке логометров, автоматических электронных мостов и нормирующих измерительных преобразователей, работающих в комплекте с термопреобразователями сопротивления.

§ 15.6. Метрологическое обеспечение средств измерений расхода

Воспроизведение единиц расхода газов и жидкостей осуществляется группой государственных эталонов, в основу работы которых положено измерение объема или массы газа (жидкости) за определенный промежуток времени.

Передача размера единицы от эталонов к рабочим средствам измерений объемного или массового расходов газа (жидкости) осуществляется

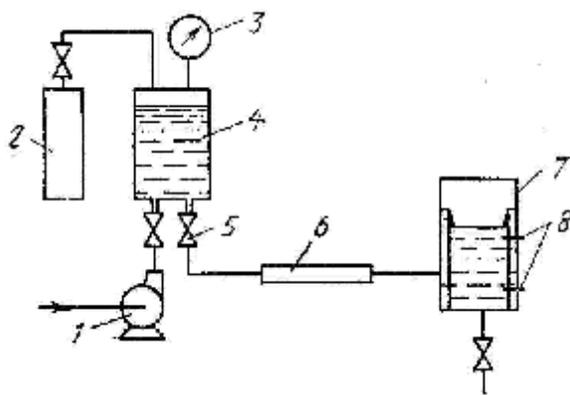


Рис. 15.10. Схема динамической расходомерной установки

образцовыми средствами измерений, в состав которых входят расходомерные установки и образцовые расходомеры. Проверку средств измерений расхода осуществляют поэлементным методом или методом непосредственного сличения. Поэлементный метод применяют при проверке расходомеров переменного перепада давления. В соответствии с этим методом сужающее устройство и дифманометр проверяют отдельно.

Метод непосредственного сличения применяют при проверке ротаметров, счетчиков газов и

счетчиков жидкостей. В процессе проверки осуществляют сличение показаний поверяемых расходомеров с показаниями образцовой расходомерной установки или образцовых расходомеров. Широкое распространение получили расходомерные установки.

На рис. 15.10 приведена схема динамической расходомерной установки. Рабочая жидкость насосом *I* закачивается в напорный

бак 4, в котором пневматической системой 2 (компрессор или баллон с нейтральным газом) создается определенное статическое давление, контролируемое манометром 3. При поверке рабочая жидкость выдавливается из напорного бака через открытый вентиль 5 в испытательный участок 6, выход которого подключен к мерному баку 7. Последний снабжен датчиками уровня 8 (в динамических объемных установках) или установлен на тензорезисторных преобразователях массы (в динамических весовых установках). В динамических объемных установках измеряют время, в течение которого рабочая жидкость заполняет объем между двумя датчиками уровня, а затем определяют дискретные значения расхода. В динамических весовых установках получают непрерывную запись значений массы рабочей жидкости, заполняющей мерный бак, и соответствующую запись времени, а затем определяют непрерывные значения расхода. Относительная погрешность воспроизведения и измерения расхода — не ниже 0,2—0,3%. Для поверки счетчиков промышленных жидкостей непосредственно на технологических потоках, например на узлах учета, широко применяют *объемные трубопоршневые расходомерные установки* (рис. 15.11).

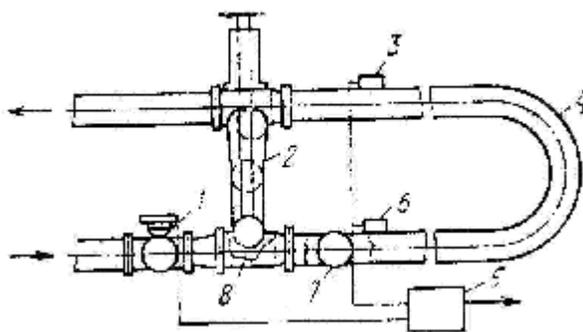


Рис. 15.11. Схема мерной установки

Трубопоршневая установка работает следующим образом. Через кран-манипулятор 2 в калиброванный участок 4, изготовленный из стальной бесшовной трубы, на внутреннюю полость которой нанесено специальное стойкое покрытие, вводятся два шаровых разделителя. Шаровой разделитель 8 выполняет функцию запорного устройства и препятствует перетоку жидкости из входного в выходной конец калиброванного участка 4, а шаровой разделитель 7 — функцию шарового поршня, выталкивающего жидкость из калиброванного участка 4 под действием напора рабочей жидкости. В момент прохождения шарового поршня мимо электромеханического детектора 6 включается счетное устройство 5, измеряющее количество импульсов, поступающих от датчика 1, преобразующих число оборотов вала поверяемого счетчика в пропорциональное число электрических импульсов. При прохождении шарового поршня мимо электромеханического детектора 3 счетное устройство выключается. Пройдя калиброванный участок, шаровой поршень 7 попадает в кран-манипулятор, выталкивает в поток шар-клапан 8 и занимает его положение. Далее цикл поверки повторяется. Объем V_c жидкости, отсчитанный по счетчику за один цикл поверки (один проход

шара-поршня по калиброванному участку), равен

$$V_c = qn, \quad (15.2)$$

где q — объем жидкости, соответствующий одному импульсу; n - число импульсов, отсчитанное счетчиком за время прохождения шаровым поршнем расстояния между детекторами $б$ и $з$.

По сравнению с рассмотренными ранее поверочными установками трубопоршневые расходомерные установки позволяют поверять счетчики жидкостей в реальных эксплуатационных условиях на любых жидкостях. Классы точности трубопоршневых расходомерных установок 0,02—0,05. Поверка расходомеров газа осуществляется на трубопоршневых расходомерных установках, принцип действия которых аналогичен рассмотренному выше. Классы точности трубопоршневых расходомерных установок, предназначенных для поверки расходомеров газа, 0,1—0,2.

§ 15.7. Метрологическое обеспечение средств измерений уровня жидкости

В состав образцовых средств измерений уровня входят уровнемерные установки и наборы образцовых уровнемеров. К числу образцовых уровнемерных установок, используемых для поверки рабочих уровнемеров промышленного применения, относятся установки с непосредственным изменением уровня жидкости и установки с имитацией изменения уровня жидкости.

Уровнемерная образцовая установка с непосредственным изменением уровня. Установка предназначена для градуировки, метрологической аттестации, испытаний и поверки уровнемеров всех типов. Установка (рис. 15.12) состоит из гидравлической и измерительной частей. Гидравлическая часть содержит две измерительные трубы $б$ и 7 , которые заполняются водой. При местном измерении уровня в измерительных трубах пользуются уровнемерным стеклом 14 , снабженным образцовой рулеткой 19 и отсчетным микроскопом 16 . Для дистанционного измерения уровня и автоматизации процедур поверки в измерительных трубах предусмотрены электроконтактные и ультразвуковые преобразователи уровня 9 , подключенные к пульта управления 15 .

Установка работает следующим образом. Поверяемые уровнемеры помещают в измерительные трубы и с пульта управления открывают клапан 4 и одновременно включают насос 20 , который подает жидкость в измерительные трубы. Как только уровень жидкости доходит до предварительной отметки «— 50 мм», где находятся ультразвуковые преобразователи уровня, клапан 4 автоматически закрывается и открывается клапан 5 меньшего сечения. Уровень жидкости доходит до преобразователей уровня, при срабатывании которых автоматически устанавливается нулевая отмет-

ка. Устанавливая поверяемые отметки по ультразвуковым преобразователям уровня жидкости, проводят поверку при прямом ходе, повышая уровень жидкости. После достижения верхнего предела измерений проводят обратный ход поверки. При этом жидкость сливают через клапан 2 (быстрое снижение уровня) и клапан 3 (медленное понижение уровня). Пределы измерений установки 0—1; 0—2,5; 0—6; 0—12 м. При дистанционном измерении абсолютная погрешность измерения ± 1 мм, а при местном измерении $\pm 0,3$ мм.

Уровнемерная образцовая установка с имитацией изменения уровня жидкости. Установка предназначена для градуировки, метрологической аттестации, испытаний и поверки следящих радиоизотопных, поплавковых уровнемеров и ультразвуковых уровнемеров с локацией через газовую среду.

Установка состоит из двух частей: имитирующей и измерительной. Имитирующая часть содержит подъемный механизм, на котором установлена уровнемерная емкость. С помощью подъемного механизма осуществляют подъем и опускание уровнемерной емкости, чем имитируется изменение уровня жидкости. Измерительная часть установки содержит фотоэлектрические преобразователи уровня, образцовую рулетку 2-го разряда, отсчетный микроскоп и микропереключатели. С их помощью осуществляется установка поверяемых отметок уровнемера.

Установка полностью автоматизирована и имеет местное, дистанционное и автоматическое управление. Диапазоны измерений установки 0—2,5 и 0—14 м. При дистанционном измерении уровня абсолютная погрешность измерения ± 1 мм, а при местном $\pm 0,3$ мм.

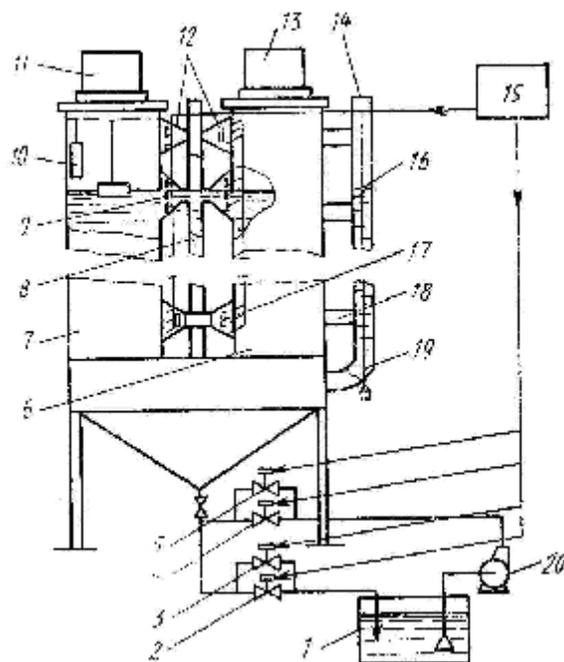


Рис. 15.12. Схема уровнемерной установки с непосредственным изменением уровня:

1 — емкость для жидкости; 2—5 — управляемые клапаны; 6, 7 — измерительные трубы; 8 — соединительная трубка; 9 — преобразователи уровня жидкости; 10 — вытеснитель; 11, 13 — поверяемые уровнемеры; 12 — конусообразные переходные секции; 14 — уровнемерная труба; 15 — пульт управления; 16 — отсчетный микроскоп; 17 — стекла; 18 — полые трубки; 19 — образцовая рулетка; 20 — насос

§ 15.8. Метрологическое обеспечение средств измерений физико-химических свойств веществ

Основу метрологического обеспечения большинства средств измерений физико-химических свойств веществ составляют *стандартные образцы физико-химического свойства и поверочные смеси*, аттестованные органами метрологических служб. Для некоторых средств измерений, рассматриваемых далее, разработаны эталоны и образцовые средства измерений.

Воспроизведение единицы плотности жидкости (кг/м^3) осуществляется государственным первичным эталоном, в основу работы которого положено измерение плотности эталонных жидкостей, имеющих плотности 650—2000 кг/м^3 , стеклянными пикнометрами или методом гидростатического взвешивания. В качестве образцовых средств измерений применяются наборы денситометров с диапазоном измерений 650—2000 кг/м^3 и основной погрешностью $\pm 1 \text{ кг/м}^3$; наборы денситометров с диапазоном измерений 650—2000 кг/м^3 с основной абсолютной погрешностью $\pm 0,3 \text{ кг/м}^3$, а также наборы стеклянных спиртометров с диапазоном измерений 0—100% и основными погрешностями, лежащими в диапазоне $\pm(0,01—0,06)\%$.

Поверку автоматических плотномеров, к числу которых относятся поплавковые, вибрационные, ультразвуковые и динамические, осуществляют в статическом режиме, используя при этом наборы поверочных жидкостей, аттестованных образцовыми денситометрами, гидростатическими весами или пикнометрами.

Поверку весовых плотномеров проводят путем нагружения измерительного преобразователя гирями, а гидростатических плотномеров — измерением высоты гидростатического столба поверочной жидкости.

Воспроизведение единицы кинематической вязкости ($\text{м}^2/\text{с}$) осуществляется государственным первичным эталоном, в основу которого положено измерение времени истечения эталонной жидкости (дистиллированной воды или специальной жидкости с вязкостью, большей или меньшей, чем вязкость дистиллированной воды) через стеклянный капилляр с висячим уровнем.

В качестве образцовых средств измерений применяют набор из девяти образцовых капиллярных вискозиметров с диапазоном измерений ($4 \cdot 10^{-7}$ — $3,5 \cdot 10^{-2}$) $\text{м}^2/\text{с}$ и набор из четырех образцовых вискозиметров с диапазоном ($1 \cdot 10^6$ — $1 \cdot 10^{-2}$) $\text{м}^2/\text{с}$. Относительные погрешности образцовых средств измерений не превышают $\pm 3 \cdot 10^{-1}\%$.

Воспроизведение единицы количества теплоты (Дж) осуществляется государственным первичным эталоном.

Передача размера единицы рабочим средствам измерений осуществляется образцовыми калориметрами, относительная погрешность которых не превышает $\pm 0,2\%$.

§ 15.9. Метрологическое обеспечение средств измерений показателей качества

В настоящее время существует более 50 видов показателей качества продуктов нефтепереработки и нефтехимии, различающихся по физической природе.

В большинстве случаев показатели качества — условные характеристики, единицы измерения которых воспроизводятся строго в детерминированных по конструкции средствах измерений и режимах их эксплуатации.

Отмеченные обстоятельства определили методы и средства обеспечения единства измерений показателей качества. В настоящее время основным средством поверки средств измерений показателей качества продуктов нефтехимии и нефтепереработки являются стандартные образцы условных характеристик нефти и нефтепродуктов и стандартизованные методы испытаний нефти и нефтепродуктов.

Например, при поверке средств измерений фракционного состава в качестве образцовых средств измерений применяют лабораторные установки, реализующие стандартные методы определения фракционного состава.

Для поверки средств измерений некоторых условных характеристик нефтепродуктов, к числу которых относится температура вспышки, разработаны образцовые средства измерений. Образцовые средства измерений температуры вспышки конструктивно аналогичны лабораторным средствам измерений, но более тщательно выполнены. Это позволяет измерять температуру вспышки с более высокой точностью. В диапазоне 20—110°C среднеквадратическое отклонение составляет $\pm 0,10^\circ\text{C}$, а в диапазоне 110—300°C — $\pm 0,22^\circ\text{C}$. Максимальная систематическая погрешность аттестованных термометров, которыми оснащаются образцовые приборы в диапазоне 20—110°C, — не более $0,25^\circ\text{C}$, а в диапазоне 110—300°C — не более $0,5^\circ\text{C}$.

§ 15.10. Метрологическое обеспечение средств измерений концентрации и состава

Основу метрологического обеспечения средств измерений концентрации газов — газоанализаторов — составляют смеси, стандартные образцы состава (поверочные газовые смеси — смеси, аттестованные органами метрологической службы), стандартизованные методики поверки и образцовые газоанализаторы. В настоящее время широкое распространение получили методы поверки газоанализаторов путем анализа поверочных газовых смесей и методом физических эквивалентов газовых смесей.

При поверке по газовым смесям известного состава сличают показания газоанализатора со значением концентрации анализируемого компонента в поверочной газовой смеси.

При поверке методом физических эквивалентов вместо аттесто-

ванной газовой смеси используют имитатор — физический эквивалент того или иного физико-химического свойства анализируемой газовой смеси. Для приготовления поверочных газовых смесей применяют манометрические, статические и динамические газосмесительные установки.

Манометрическая газосмесительная установка предназначена для приготовления поверочных газовых смесей в диапазоне 0,1—99%. Принцип работы установки состоит в заполнении при постоянной температуре газового баллона до давления P_1 измеряемым газом, а затем до давления P_2 газом-разбавителем. При заполнении давление в газовом баллоне определяют по показаниям образцового манометра. Концентрацию C измеряемого газа в поверочной газовой смеси, заполняющей баллон, вычисляют по формуле

$$C = \frac{P_1}{P_1 + P_2} 100\% . \quad (15.3)$$

Погрешность приготовления поверочной газовой смеси $\pm(1—4)\%$.

Статическая газосмесительная установка предназначена для приготовления поверочных газовых смесей на основе взрывоопасных компонентов, например водород — воздух, метан — воздух и других, с концентрацией измеряемого компонента в диапазоне 0,001—0,5%. Принцип работы установки состоит в смешении при постоянной температуре T измеряемого газа объемом V_1 с газом-разбавителем объемом V_2 и последующего определения концентрации C измеряемого газа в поверочной газовой смеси, заполняющей объем $V_1 + V_2$:

$$C = \frac{V_1}{V_1 + V_2} 100\% . \quad (15.4)$$

Погрешность приготовления поверочной газовой смеси $\pm(1—5)\%$.

Динамические газосмесительные установки предназначены для создания микроконцентраций веществ в газах и подразделяются на реометрические и диффузионные. Отличительной особенностью рассматриваемых установок является формирование поверочной газовой смеси путем смешения потока измеряемого газа расходом Q_1 с потоком газа-разбавителя расходом Q_2 , т. е. формирование поверочной газовой смеси осуществляется в динамическом режиме. В реометрических газосмесительных установках контроль за расходом газовых потоков осуществляется по показаниям реометров — капиллярных расходомеров. Концентрацию C измеряемого газа в поверочной газовой смеси определяют по формуле

$$C = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} 100\% . \quad (15.5)$$

В *диффузионных газосмесительных установках* подачу измеряемого вещества в поток газа-разбавителя осуществляют через диффузионный барьер. Расход измеряемого вещества определяют путем

измерения объема, прошедшего через диффузионный барьер, измеряемого вещества в паровой фазе за определенный интервал времени. Контроль за расходом Q_2 газа-разбавителя осуществляется капиллярным расходомером. Концентрацию измеряемого вещества в газе-разбавителе определяют по формуле (15 5). Погрешность приготовления поверочной газовой смеси на динамических газосмесительных установках $\pm (2—8) \%$.

Для приготовления поверочных газовых смесей, содержащих в качестве измеряемого компонента влагу, применяют смесительные установки, именуемые генераторами парогазовой смеси — *гигростатами*. Гигростаты являются основным средством поверки влагомеров газов. Разработаны гигростаты, основанные на принципах: двух температур, двух давлений и смешения. Формирование газовой смеси заданной относительной влажности в *гигростате, основанном на принципе двух температур*, достигается путем увлажнения газа до давления насыщения P при температуре t_1 . Далее температуру увлажненного газа повышают до значения t_2 , при котором давление насыщения паров становится равным P_2 . В результате в рабочей камере устанавливается относительная влажность $\varphi = P_1/P_2$. Воспроизводимость относительной влажности гигростатами этого типа $\pm(0,5-1)\%$.

В *гигростатах, основанных на принципе двух давлений*, газ насыщают влагой при температуре t_1 и давлении P_1 а затем давление увлажненного газа уменьшают до значения P_2 . При постоянной температуре t_1 уменьшение давления P_1 до значения P_2 приводит к уменьшению влажности газа. Гигростаты, основанные на принципе двух давлений, позволяют получать парогазовые смеси с абсолютной влажностью $0,78—69 \text{ г/м}^3$ при относительной погрешности $\pm(1-2)\%$.

В *гигростате, основанном на принципе смешения*, формирование газа заданной влажности достигается путем смешения двух потоков газа, один из которых увлажнен до насыщения, а другой предельно осушен. Путем изменения соотношения расходов указанных потоков заданная влажность достигается в пределах от 10 до 100% с абсолютной погрешностью $\pm (0,5—1) \%$.

Для поверки влагомеров газа с пределами измерений от $2 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^{-2} \%$ об. применяют *диффузионные гигростаты*, представляющие собой пористую цилиндрическую трубку или мембрану, создающую диффузионный барьер. С одной стороны барьер омывается водой, а с другой осушенным газом. Количество диффундирующей влаги определяется температурой и поверхностью диффузионного барьера. Относительная погрешность поверочной газовой среды, формируемой диффузионным гигростатом, $\pm (2—5) \%$.

Основу метрологического обеспечения средств измерений концентраций жидких сред кондуктометров, рН-метров и влагомеров нефти и нефтепродуктов составляют образцовые средства измерений и стандартные образцы состава.

Образцовые средства измерений, применяемые для передачи

размера единицы удельной электрической проводимости (См/м) рабочим средствам измерений, подразделяют на два разряда.

Образцовые кондуктометры с пределами измерений от $0—10^{-4}$ до $0—10^2$ См/м и пределом допускаемой относительной погрешности $\pm(0,25—1)\%$ используют для поверки кондуктометрических анализаторов общепромышленного применения с пределом допускаемой относительной погрешности $\pm(0,5—6)\%$.

Основную погрешность кондуктометрических анализаторов определяют комплектным или поэлементным методом.

При комплектном методе производят сличение показаний поверяемого анализатора с показаниями образцового кондуктометра. В качестве рабочих жидкостей используют поверочные растворы.

При поэлементном методе определяют основную погрешность измерительного блока анализатора и постоянную первичного преобразователя. Поверку проводят на поверочных установках с пределами измерений $0—10$; $0—100$; $0—10^{-4}$; $0—0,1$ См/м.

Передача размера единицы рН от эталона рабочим средствам измерений рН осуществляется образцовыми средствами, подразделяемыми на четыре разряда, а также образцовыми средствами измерений массы, объема и ЭДС постоянного тока. Поверку рН-метров проводят поэлементным или комплектным методом. Поверка рН-метра поэлементным методом включает раздельную поверку измерительного преобразователя и электродов.

Основную погрешность измерительного преобразователя определяют методом сличения с показаниями образцового потенциометра.

Измерительные электроды поверяют по *образцовым буферным растворам*, а поверку вспомогательных электродов осуществляют методом сличения с образцовыми электродами с помощью компаратора.

Поверку рН-метра комплектным методом проводят путем сличения показаний рН-метра со значением рН-образцового буферного раствора.

Поверку рабочих средств измерений влажности нефти и нефтепродуктов осуществляют образцовыми установками для воспроизведения *образцовых эмульсий* со значением объемного влагосодержания от 0,05 до 60% с пределом допускаемой приведенной погрешности $\pm(0,8—2)\%$ и образцовыми средствами измерений, заимствованными из других поверочных схем. К их числу относятся меры тангенса угла потерь, меры емкости, а также образцовые жидкости с диэлектрической проницаемостью от 2 до 6. Метрологическое обеспечение средств измерений состава многокомпонентных веществ базируется на образцовых средствах измерений времени, объема, массы, ЭДС и напряжения постоянного тока, а также на поверочных смесях, аттестованных органами метрологической службы, или стандартных образцах состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основной тенденцией в развитии автоматизации химико-технологических процессов в настоящее время является применение АСУ ТП, осуществляющих оптимизацию этих процессов.

В таких АСУ ТП требования к надежности и особенно к точности средств измерений сильно возрастают. Последнее определяется следующими обстоятельствами. Известно, что наиболее эффективным видом автоматизации является автоматический контроль, позволяющий повышать экономическую эффективность производства на несколько десятков процентов по сравнению с неавтоматизированным производством. Применение АСУ (см. Введение) редко позволяет получить дополнительный эффект, составляющий более 10%. Экономический эффект от применения АСУ ТП для оптимизации процессов обычно не превышает 2—3%, а чаще составляет 1 %.

Для оценки этого эффекта необходимы измерительные устройства соответствующей точности. Большинство же измерительных устройств и систем, используемых для проведения технологических измерений, имеют погрешность, равную или большую чем $\pm 1\%$ (см. гл. 4—13). Причем эту погрешность в условиях технологического процесса невозможно устранить или уменьшить.

Повышение точности измерительных устройств для решения задач автоматизации управления технологическими процессами необходимо еще и потому, что измерительные устройства, а именно датчики, устанавливаемые на технологических процессах, как правило, используются при создании математических моделей объектов управления (см. гл. 3). Без соответствующей точности этих измерительных устройств сама оптимизация объектов управления становится проблематичной. В связи с этим повышение точности средств технологических измерений — одна из основных задач приборостроения.

В то же время развитие и совершенствование технологии переработки нефти и газа постоянно ставит перед создателями средств измерений новые и, как правило, более сложные задачи. Особенно это касается контроля качества сырья, промежуточных и конечных продуктов.

Усилия ученых и инженеров, работающих в области приборостроения, направлены как на создание новых средств измерений, позволяющих решать названные задачи, так и на совершенствование средств измерений, обеспечивающих решение традиционных задач автоматического контроля.

Решение этих двух проблем базируется прежде всего на использовании для измерений новых физических явлений. Новейшие достижения физики, аналитической и физической химии находят в приборостроении самое широкое применение. Совершенствование средств технологических измерений в настоящее время направлено на повышение их надежности, снижение материалоемкости и инерционности и, самое главное, на повышение точности.

При создании средств измерений доминирующим методом повышения точности остается метод параметрической стабилизации.

В последние годы все более широкое применение получают структурные методы повышения точности средств измерений (см. § 3.8), базирующиеся на применении средств микропроцессорной техники (см. гл. 14). При этом из структурных методов наиболее широко применяются: метод вспомогательных измерений, обеспечивающий коррекцию статической характеристики средств измерений в зависимости от основных влияющих величин, и метод образцовых сигналов, позволяющий осуществлять периодическую самоградуировку средств измерений. Создаваемые на основе названных и других методов повышения точности средства измерений, включающие в себя микропроцессоры, называют *интеллектуальными*.

Освоение выпуска дешевых и разнообразных средств микропроцессорной техники уже сейчас делает экономически и технически целесообразным автоматический контроль параметров, определение которых связано с необходимостью выполнения косвенных и совокупных измерений. Широкие перспективы имеет применение средств микропроцессорной техники в автоматических анализаторах качества, применение которых в АСУ ТП позволяет осуществлять управление химико-технологическими процессами непосредственно по показателям качества сырья, реагентов, промежуточных и конечных продуктов, упрощает алгоритмы управления и обеспечивает большую эффективность автоматизации управления. Целесообразность использования средств микропроцессорной техники в анализаторах качества определяется тем, что для эффективной работы последних необходимо выполнять большое число операций логического и аналогового управления, обрабатывать, хранить и отображать большой объем измерительной информации и справочных данных (см. гл. 14). Включение в состав анализаторов качества микропроцессорных устройств улучшает их метрологические и информационные характеристики.

Количественно задачи повышения точности средств технологических измерений, решаемые в настоящее время, могут быть охарактеризованы классами точности средств измерений: давления; температуры, уровня 0,1—0,2; расхода 0,2—0,5; качества 0,5—2.

Создание средств технологических измерений с такими точностными характеристиками и широкое применение автоматических анализаторов качества позволят поставить автоматический контроль и управление химико-технологическими процессами на новый, более совершенный уровень.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Вспомогательные термины и понятия

Контроль — установление соответствия между состоянием (свойством) объекта контроля и заданной нормой, определяющей качественно различные области его состояния. (Если для контроля используются автоматические измерительные устройства, то его называют автоматическим контролем.)

Автоматическое регулирование — поддержание постоянной некоторой заданной величины, характеризующей процесс, или изменение ее по заданному закону, осуществляемое с помощью измерения состояния объекта или действующих на него возмущений и воздействия на регулирующий орган объекта.

Автоматическое управление — автоматическое осуществление совокупности воздействий, выбранных из множества возможных на основании определенной информации и направленных на поддержание или улучшение функционирования управляемого объекта в соответствии с целью управления.

Оптимизация — в общем случае целенаправленная деятельность, заключающаяся в получении наилучших результатов при соответствующих условиях.

Математическая модель объекта управления — уравнение (или система уравнений), связывающее все входные и выходные параметры объекта и управляющие воздействия.

Критерий управления (оптимальности) — соотношение, характеризующее качество работы объекта управления в целом и принимающее различные значения в зависимости от используемых воздействий (например, максимальный выход продукта при заданном расходе сырья, максимальный доход, минимальная себестоимость продукции при заданном качестве и т. д.).

Ограничения — значения входных и выходных параметров, ограниченных технологическими возможностями аппаратов и техническими условиями, определяющими количественные соотношения выпускаемых продуктов, и их качеством.

Алгоритм управления — совокупность предписаний, определяющих характер воздействий извне на объект управления с целью правильного выполнения технологического процесса в этом объекте. (Алгоритм управления разрабатывается в результате исследовательской работы на основе модели объекта управления, критерия оптимизации и ограничений, представляется некоторой системой уравнений и реализуется в процессе управления с помощью УВМ.)

Однозначная мера — мера, воспроизводящая физическую величину одного размера (например, гиря, конденсатор постоянной емкости и др.).

Стандартный образец — мера для воспроизведения величин, характеризующих свойства или состав веществ и материалов (например, образцы свойств нефтей и нефтепродуктов и т. д.)

Образцовое вещество — образцовая мера в виде вещества с известными свойствами, воспроизводимыми при совпадении условий приготовления, указанных в утвержденной спецификации (например, «чистая» вода, «чистые» газы и т. д.).

Многозначная мера — мера, воспроизводящая ряд одноименных величин различного размера (например, миллиметровая линейка, конденсатор переменной емкости и т. д.).

Аналоговый измерительный прибор — измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией измеряемой величины.

Цифровой измерительный прибор — измерительный прибор, автоматически вырабатывающий дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме.

Показывающий измерительный прибор — измерительный прибор, допускающий только отсчитывание показаний. Показывающий прибор может быть аналоговым или цифровым.

Регистрирующий измерительный прибор — измерительный прибор, в котором предусмотрена регистрация показаний.

Самопишущий измерительный прибор — регистрирующий измерительный прибор, в котором предусмотрена запись показаний в форме диаграммы. Самопишущие приборы обычно бывают аналоговыми.

Печатающий измерительный прибор — регистрирующий измерительный прибор, в котором предусмотрено печатание показаний в цифровой форме. Печатающие приборы обычно бывают цифровыми.

Суммирующий измерительный прибор — измерительный прибор, показания которого функционально связаны с суммой двух или нескольких величин, подводимых к нему по различным каналам.

Интегрирующий измерительный прибор — измерительный прибор, в котором подводимая величина подвергается интегрированию по времени или по другой независимой переменной.

Первичный измерительный преобразователь (или датчик) — измерительный преобразователь, к которому подведена измеряемая величина.

Промежуточный измерительный преобразователь — измерительный преобразователь, занимающий в измерительной цепи место после первого.

Передающий измерительный преобразователь — измерительный преобразователь, предназначенный для дистанционной передачи сигнала измерительной информации.

Масштабный измерительный преобразователь — измерительный преобразователь, предназначенный для изменения величины в заданное число раз (по существу это усилитель сигнала измерительной информации).

Функциональный измерительный преобразователь — измерительный преобразователь, предназначенный для формирования сигнала измерительной информации, связанного с измеряемой величиной некоторой заданной функцией.

Система автоматического контроля — ИИС, предназначенная для установления соответствия между значениями контролируемых параметров и соответствующими заданными нормами.

Система технической диагностики — ИИС, предназначенная для выявления причин неправильного функционирования технических объектов.

Система распознавания образов — ИИС, предназначенная для установления соответствия между распознаваемым объектом и заданным образом.

Входной сигнал — сигнал, поступающий на вход измерительного устройства.

Выходной сигнал — сигнал, получаемый на выходе измерительного устройства.

Информативный параметр входного сигнала измерительного устройства — параметр входного сигнала, функционально связанный с измеряемой величиной и используемый для передачи ее значения (для промежуточных измерительных преобразователей и вторичных приборов) или являющийся самой измеряемой величиной (для первичных преобразователей и приборов).

Информативный параметр выходного сигнала измерительного устройства — параметр выходного сигнала, функционально связанный с информативным параметром входного сигнала и используемый для передачи или индикации значения информационного параметра входного сигнала.

Неинформативный параметр входного сигнала измерительного устройства — параметр входного сигнала, не используемый для передачи значения измеряемой величины.

Неинформативный параметр выходного сигнала измерительного устройства — параметр выходного сигнала, не используемый для передачи или индикации значения информативного параметра входного сигнала.

Функция влияния — зависимость изменения какой-либо метрологической характеристики средств измерений от изменений влияющей величины или совокупности влияющих величин.

Статическая погрешность средства измерения (в том числе измерительного устройства) — погрешность, возникающая при использовании его для измерения постоянной величины.

Погрешность средства измерений (в том числе измерительного устройства) *в динамическом режиме* — погрешность, возникающая при использовании его для измерения переменной во времени ве-

личины. (Для определения этой погрешности необходимо осуществить сравнение выходного сигнала данного средства измерений, т. е. такого устройства, у которого переходная характеристика имеет вид, показанный на рис. 2.5, б.)

Динамическая погрешность средства измерений (измерительного устройства) — разность между погрешностью средства измерений в динамическом режиме и его статической погрешностью, соответствующей значению величины в данный момент времени.

Дрейф нуля измерительного устройства — медленное изменение значения выходного сигнала при нулевом значении входного сигнала. (Дрейф нуля связан с нестабильностью элементов измерительного устройства.)

Шум — случайные колебания, которые присутствуют в выходном сигнале измерительного устройства. (Причинами шума являются молекулярные, электронные, ионные и другие процессы в лампах, транзисторах, резисторах, детекторах заряженных частиц и молекул и других элементах измерительных устройств.)

Фон — периодические колебания, которые присутствуют в выходном сигнале измерительного устройства. (Причиной фона часто является наличие электромагнитной или электростатической связи узлов измерительного устройства с общегородской сетью, являющейся источником питания.)

Точность средства измерений — качество средства измерений, отражающее близость к нулю его погрешности.

Сходимость показаний средства измерений — качество средства измерений, отражающее близость к нулю его случайной погрешности.

Блок — самостоятельная часть средства измерений, выполняющая определенную функцию и конструктивно размещаемая чаще всего в одном корпусе с другими блоками.

Модуль — типовая легкоъемная часть блока или средства измерений, объединяющая ряд деталей соответствующего назначения в общей функциональной схеме.

Эксперимент или экспериментальное исследование (от лат. *ex-perimentum* — проба, опыт) — метод познания, с помощью которого исследуются реальные явления действительности, реальные функциональные связи между параметрами, характеризующими состояние изучаемого объекта. (В точных науках и технике эксперимент неразрывно связан с проведением различных измерений, т. е. он может быть назван измерительным экспериментом.)

Аналого-цифровой преобразователь — измерительное устройство, служащее для преобразования аналоговой величины (ток, напряжение) на входе в дискретную величину на выходе преобразователя, представленную в виде некоторого цифрового кода.

Цифроаналоговый преобразователь — измерительное устройство, предназначенное для преобразования входной величины, представленной числовым кодом, в эквивалентное значение какой-либо непрерывной физической величины. Код обычно представлен в дво-

ичной или двоично-десятичной системе счисления. Выходная величина обычно представляет собой напряжение (ток).

Частотно-цифровой преобразователь — измерительное устройство, служащее для преобразования частоты обычно гармонических колебаний в некоторый цифровой код.

Приложение 2

Коэффициенты распределения Стьюдента

$k = n-1$	Вероятность			
	0,5	0,9	0,95	0,99
1	1,00	6,31	12,70	63,70
2	0,82	2,92	4,30	9,92
3	0,77	2,35	3,18	5,84
4	0,74	2,13	2,78	4,60
5	0,73	2,02	2,57	4,03
6	0,72	1,94	2,45	3,71
7	0,71	1,90	2,37	3,50
8	0,71	1,86	2,31	3,36
9	0,70	1,83	2,26	3,25
11	0,70	1,80	2,20	3,10
13	0,69	1,77	2,16	3,01
15	0,69	1,75	2,13	2,95
17	0,69	1,74	2,11	2,90
19	0,69	1,73	2,09	2,86

Приложение 3

Соотношение единиц давления

Наименование единиц	Па	бар	кгс/см ²	кгс/м ² (мм вод. ст.)	атм
Паскаль	1	10 ⁻⁵	1,01972·10 ⁻⁵	1,01972·10 ⁻¹	9,86922·10 ⁻⁶
Бар	10 ⁵	1	1,01972	9,80665·10	9,80665·10 ⁻¹
Килограмм-сила на квадратный	9,80665·10 ⁴	9,80665·10 ⁻⁴	1	10 ⁴	9,67840·10 ⁻¹
Атмосфера физическая	1,01325·10 ⁵	1,01325	1,03323	1,03323·10 ⁴	1
Миллиметр ртутного столба (торр)	133,322	1,33322·10 ⁻³	1,35951·10 ⁻³	13,5951	760

Приложение 4а

Выражения, описывающие оценку среднеквадратического отклонения (СКО) результата косвенного измерения для распространенных функций

Функция	Оценка абсолютного СКО $s(\tilde{y})$	Оценка относительного СКО $d(\tilde{y})$
$X_1 + X_2$	$\pm \sqrt{s^2(\tilde{X}_1) + s^2(\tilde{X}_2)}$	$\pm \sqrt{[s^2(\tilde{X}_1) + s^2(\tilde{X}_2)] / (\tilde{X}_1 + \tilde{X}_2)^2}$
$X_1 X_2$	$\pm \sqrt{\tilde{X}_2^2 s^2(\tilde{X}_1) + \tilde{X}_1^2 s^2(\tilde{X}_2)}$	$\pm \sqrt{[s(\tilde{X}_1)/\tilde{X}_1]^2 + [s(\tilde{X}_2)/\tilde{X}_2]^2} = \pm \sqrt{d^2(\tilde{X}_1) + d^2(\tilde{X}_2)}$
X_1/X_2	$\pm \sqrt{[\tilde{X}_2^2 s^2(\tilde{X}_1) + \tilde{X}_1^2 s^2(\tilde{X}_2)] / \tilde{X}_2^4}$	$\pm \sqrt{[s(\tilde{X}_1)/\tilde{X}_1]^2 + [s(\tilde{X}_2)/\tilde{X}_2]^2} = \pm \sqrt{d^2(\tilde{X}_1) + d^2(\tilde{X}_2)}$
X^n	$\pm n \tilde{X}^{n-1} s(\tilde{X})$	$\pm n \frac{s(\tilde{X})}{\tilde{X}} = \pm n d(\tilde{X})$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулаков М. В. Технологические измерения и приборы для химических производств. — М.: Машиностроение, 1983.
2. Исакович Р. Я. Технологические измерения и приборы. — М.: Недра, 1979.
3. Преображенский В. П. Теплотехнические измерения и приборы. — М.: Энергия, 1978.
4. Кондрашкова Г. А. Технологические измерения и приборы в целлюлозно-бумажной промышленности. — М.: Лесная промышленность, 1981.
5. Майзель М. М., Смирнов С. М. Технологические измерения и приборы легкой промышленности. — М.: Машиностроение, 1971.
6. Иванова Т. М., Кузнецов И. Д., Чистяков В. С. Теплотехнические измерения и приборы. — М.: Энергоатомиздат, 1984.
7. Чистяков С. Ф., Радун Д. В. Теплотехнические измерения и приборы. — М.: Энергия, 1972.
8. Хофман Д. Техника измерения и обеспечения качества. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
9. Бурдун Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии. — М.: Изд-во стандартов, 1985.
10. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. — Л.: Энергия, 1978.
11. ГОСТ 8.009—84. Нормируемые метрологические характеристики средств измерений.
12. Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации/Под ред. Г. И. Ковалерова. — М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1981.
13. Гонек Н. Ф. Манометры. — Л.: Машиностроение, 1979.
14. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества. — Л.: Машиностроение, 1975.
15. Фремке А. В. Телеизмерения. — М.: Высшая школа, 1975.
16. Климовицкий М. Д., Копелович А. П. Автоматический контроль и регулирование в черной металлургии. — М.: Металлургия, 1967.
17. РД-50-213—80. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами. — М.: Изд-во стандартов, 1982.
18. РД-50-411—83. Методические указания. Расход жидкостей и газов. Методика выполнения измерений с помощью специальных сужающих устройств. — М.: Изд-во стандартов, 1984.
19. Автоматизация и средства контроля производственных процессов в нефтяной и химической промышленности: Справочник. Т. 4. — М.: Недра, 1973. >
20. Кивилис С. С. Плотномеры. — М.: Энергия, 1980.
21. Ваня Я. Анализаторы газов и жидкостей. — М.: Энергия, 1970.
22. Фарзана Н. Г., Илясов Л. В., Азим-заде А. Ю. Автоматические детекторы газов и жидкостей. — М.: Энергоатомиздат, 1983.
23. Чельцов А. В. Измерительные устройства для контроля качества нефтепродуктов. — Л.: Химия, 1981.
24. Берлинер М. А. Измерения влажности. — М.: Энергия, 1973.
25. Никольский Б. П., Матерова Е. А. Ионоселективные электроды. — Л.: Химия, 1980.
26. Тхоржевский В. П. Автоматический анализ газов и жидкостей на химических предприятиях. — М.: Химия, 1976.
27. Липавский В. И., Березкин В. Г. Автоматические газовые потоковые хромографы. — М.: Химия, 1982.
28. ГОСТ 8.207—76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.

29. РД-50-555—85. Методические указания. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценка их погрешностей.

30. *Земельман М. А.* Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств.— М.: Изд-во стандартов, 1972.

31. *Куликовский К- А., Купер В. Я.* Методы и средства измерений. — М.: Энергоатомиздат, 1986.

32. *Мелик-Шахназаров А. М., Маркатун М. Г., Дмитриев В. Д.* Измерительные приборы со встроенными микропроцессорами. — М.: Энергоатомиздат, 1985.

33. Государственные эталоны и общесоюзные поверочные схемы. — М.: Изд-во стандартов, 1978.

34. *Илясов Л. В.* Эвапорографические и диффузионные методы автоматического анализа веществ. — М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1979.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Автоматизация** производственных процессов 7
Алгоритм управления 11, 441
Анализатор автоматический 264
— полуавтоматический 264
— жидкости диэлькометрический 311
— многопараметрический 355
— октанового числа 393
— пламенный 349
— потенциометрический 335
— степени отгона 389
— температуры вспышки 391
— температуры выкипания 388
— термохимический 328
— хроматографический 369, 376
- Барометр** 97
Блок 65, 444
- Вакуумметр** 97
Вариация 53, 56, 58
Величина измеряемая 15
— физическая 13
— — влияющая 16
Вероятность безотказной работы 62
— доверительная 29, 75
Вещество 260
— анализируемое 260
Вискозиметр 283
Время реакции 45
- Газоанализатор** 266
— гальванический 345
— деполяризационный 347
— конденсационный 309
— кулонометрический 348
— многопараметрический 355
— хроматографический 369
Гигростат 437
Градуировка 416
- Давление** абсолютное 95
— барометрическое 95
— избыточное 95
Датчик 8, 442
Детектор 369, 373, 377, 405
Деформация остаточная 106
- Диапазон** измерений 37, 39
— показаний 37, 39
Дифманометр поплавковый 98
— колокольный 100
— мембранный 117, 119
— сильфонный 110
Дозатор 372
Дрейф нуля измерительного устройства 51, 444
- Единица** давления 95
— температуры 147
— уровня 242
— расхода 205
— количества 205
— концентрации 261
Единообразие средств измерений 414
Единство измерений 13
- Задатчик** давления автоматический 423
Значение физической величины 15
— — — действительное 16
— — — истинное 16
- Измерение** 15
Измерения контрольно-поверочные 17
— косвенные 19
— максимально возможной точности 17
— обыкновенные 19
— прямые 19
— совместные 20
— совокупные 19
— статистические 19
— теплотехнические 6
— технологические 6
— физико-химические 7
— электрические 6
Импеданс входной 41
— выходной 41
Интенсивность потока отказов 62
Интервал доверительный 29
Интерфейс 399, 400
- Калориметр** 291
Качество продукции 259
Класс точности 58

- Колонка хроматографическая 366, 372
 Комплекс измерительно-вычислительный 408
 Комплекс средств аналитической техники 271
 Комплекс управляющий вычислительный 10, 11, 409
 Комплект микропроцессорный 398
 Компонент определяемый 262
 —неопределяемый 262
 Контроль автоматический 8
 —аналитический 263
 Концентрация массовая 261
 —молярная 261
 —объемная 261
 Коэффициент преобразования 40
 —передачи 40
 Кривая разгона 42
 Критерий ничтожности погрешности 82
 Критерий управления 11, 441
- Логометр 187
- Мановакуумметр** 97
Манометр 95
 —грузопоршневой 421
 —цифровой автоматический 252
 Материал 260
 Мембрана упругая 104
 —эластичная 105
 Метод анализа физический 264
 —физико-химический 264
 —химический 264
 Метод измерений непосредственной оценки 20, 21
 — — сравнения с мерой 20, 21
 Метод наименьших квадратов 82
 Метод повышения точности измерений 89, 90
 — — — средств измерений 90, 92
 Методика выполнения измерений 70
 Мера 32
 Метрология 13
 Механизм измерительный 36
 Милливольтметр 166
 Микроконтроллер 399, 401
 Микропроцессор 397
 МикроЭВМ 398
 Модуль 65
 Модуляция 121
- Напоромер** 97
Наработка на отказ 62
- Образцы стандартные** 434
Объект измерения 15
Ограничения 11, 441
Ожидание математическое 28
Отклонение среднеквадратическое 28
Оптимизация 11
Оценка параметров функции распределения 75
 — погрешности интервальная 75
- Параметр информативный входного (выходного) сигнала** 38, 41, 443
 —неинформативный входного (выходного) сигнала 443
Пирометр 191
Плотномер газов 278, 279, 281
 —жидкостей 275, 278, 281
Поверка средств измерений 414
Погрешность измерений случайная 26
 — — систематическая 26, 30
Погрешность средств измерений абсолютная 47, 48
 — — — аддитивная 51
 — — — динамическая 47, 444
 — — — дополнительная 47
 — — — гистерезиса 52
 — — — линейности 52
 — — — мультипликативная 51
 — — — основная 45
 — — — относительная 48, 49
 — — — приведенная 48, 49
- Показания** 37
Показатель качества продукции 259
 — — нефтепродуктов 380
Постоянная времени 43
Потенциометр 169
Предел измерений верхний 39
 — — нижний 39
Порог чувствительности 40
Преобразование измерительное 14
Преобразователь давления 111
 — измерительный аналого-цифровой 399, 444
 — — масштабный 33, 443
 — — нормирующий 65, 66, 176, 190
 — — передающий 33, 442
 — — первичный 33, 442
 — — промежуточный 33, 442
 — — функциональный 33
 — — цифроаналоговый 404, 444

- — частотно-цифровой 399, 445
- концентрации 294
- перемещение — ток 122, 132
- — пневмоэлектрический 140
- расхода 211, 228, 233, 235, 238
- сила — давление 122, 123, 245
- сила — ток 122, 128, 245
- сила — частота 134
- сопло-заслонка 123
- температуры 156, 178
- уровня 254
- электропневматический 142
- Прибор измерительный 32
 - — аналоговый 33, 442
 - — вторичный 8, 60
 - — интегрирующий 33, 442
 - — печатающий 33, 442
 - — показывающий 33, 442
 - — регистрирующий 33, 442
 - — суммирующий 33, 442
 - — цифровой 33
- Размах выходного сигнала измерительного устройства 53, 57
- Распределение двухмодальное 30
 - нормальное 28
 - Стьюдента 76
 - равномерное 29
- Расходомер дроссельный 211
 - капиллярный 225
- Регулирование автоматическое 8, 9
- Регулировка средств измерений 416
- Репер 14
- Рефрактометр 287

- Стабилизатор расхода мембранный 251
- Свойство вещества физическое 260
 - — химическое 260
- Свойство продукции 259
- Сельсин-датчик 139
 - приемник 139
- Сигнал 8, 16
 - измерительной информации 16, 32
- Сигналы аналоговые ГСП 64
- Сильфон 104
- Система автоматического контроля 8
 - измерительная 34,
 - информационно-измерительная 34, 408
 - регулирования автоматическая 9
- — распознавания образов 408
- технической диагностики 408
- управления автоматизированная 10
- Система приборов и средств автоматизации государственная (ГСП) 63
- Смесь анализируемая 261
 - бинарная 262
 - многокомпонентная 262
 - поверочная 435
 - псевдобинарная 262
- Состав смеси качественный 261
 - — количественный 261
 - — фракционный 381
- Среднее арифметическое 75
- Средство измерений давления 95
 - — количества 206, 208
 - — концентрации 294
 - — образцовое 35
 - — показателей качества 380
 - — рабочее 35
 - — расхода 211
 - — уровня 242
 - — температуры 143
 - — физико-химических свойств 273
- Стекло уровнемерное 242
- Счетчик вещества объемный 206
 - — скоростной 208

- Температура 143
- Термометр стеклянный 426
- Техника измерительная 5
- Точность измерений 17
 - средств измерений 444
- Тягонапомер 97

- Управление автоматическое 10, 441
- Уровнемер буйковый 245
 - емкостный 254
 - кондуктометрический 256
 - поплавковый 243
 - пьезометрический 250
- Установка газосмесительная 436
 - измерительная 34
 - измерительная поверочная 417
 - расходомерная 431
 - динамическая 431
 - — трубопоршневая 431
 - уровнемерная 432
- Устройство аналитическое 267
 - измерительное 32
 - отсчетное 36

—регистрирующее 36

Функция влияния 47, 56, 443

— передаточная 42

— преобразования 38

— — номинальная 50

— — реальная 50

Чувствительность 39

Шкала 14

—международная практическая 148

—печатная 416`

—термодинамическая 145

—условная

— физической величины

Шум 51, 444

Элемент преобразовательный 35

— нормальный 173, 428

— чувствительный 36

Эксперимент 68

Характеристика измерительного устройства
временная 42

— — — динамическая 41

— — — переходная 42

— — — статическая 38

Хроматограмма 371

Хроматография 365

Цена деления 40

Цель измерительная 36

