1463
66.012.1
Щ58

С. И. ЩЕПКИН

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И РЕГУЛИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ В ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

ГОСХИМИЗДАТ
1945

Проф. С. И. ЩЕПКИН

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА БССР

КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И РЕГУЛИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ В ХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВАХ

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА БССР
Инв. № 14613

ГХИ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО ХИМИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА — 1945

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БИБЛИОТЕКА БССР

К ЧИТАТЕЛЮ

Прежде чем пользоваться книгой, исправьте следующие опечатки

Страница	Строка	Напечатано	Должно быть
125	27 сверху	обрабатывается	обрывается
139	4 снизу	(рис. 124)	(рис. 125)
170	2 снизу	$\ldots + U_{ba}(t_o + \sigma_a(t_o t) - \ldots$	$\ldots + U_{ba}(t_o) + \sigma_a(t_o t) - \ldots$
171	4 сверху	$\sigma_a(t_o t) - \sigma_a(t' o t)\sigma_a(t_o t' o)$	$\sigma_a(t_o t) - \sigma_a(t' o t) = \sigma_a(t_o t' o)$
171	6 сверху	$- U_{ca}(t' o) = U_{ac} t' o)$	$- U_{ca}(t' o) = U_{ac}(t_o')$
174	7 и 8 сверху	Железо (проволока диаметром $\leqslant 3{,}0$ *мм*)	Железо (проволока диаметром $\leqslant 1{,}0$ *мм*)
		Железо (проволока диаметром $\geqslant 1{,}0$ *мм*)	Железо (проволока диаметром $\geqslant 3{,}0$ *мм*)
193	17 сверху	2.01^{-3}	2.10^{-3}
220	Формула (196)	$R_t + r' o = (r_3 + r' o)\ \frac{r_2}{r_1}$	$R_t + r_o = (r_3 + r_o)\ \frac{r_2}{r_1}$
229	1 снизу	$I\gamma$	$I\lambda$
428	18 снизу	Пропущено слово	
	левый столбец	„Фильтры“	

На стр. 341 рис. 294 перевернут.

Зак. 3311.

621.991
Из. 58

Инд. 17-5(2)

Книга является справочником, а также учебным пособием для втузов и техникумов химической промышленности.

Она содержит описание принципов работы и устройства контрольно-измерительных приборов, применяемых для контроля технологических процессов химических производств, а также сведения об областях применения, установке и поверке приборов.

В последней части книги вкратце рассматриваются вопросы автоматического регулирования, основные элементы регуляторов и главнейшие их типы.

Материал, содержащийся в книге, может быть полезен для инженерно-технических работников химических и родственных им заводов.

К ЧИТАТЕЛЮ

Издательство просит присылать Ваши замечания и отзывы об этой книге по адресу: Москва, Новая площадь, 10, подъезд 11, Госхимиздат.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эта книга представляет собой обработанный конспект курса контрольно-измерительных приборов, читанного автором в Московском институте химического машиностроения. Как учебное пособие по этому курсу книга в первую очередь и предназначается.

Курс контрольно-измерительных приборов, введенный в учебный план МИХМ, ставит своей задачей ознакомление будущих инженеров-механиков химических заводов с основными методами автоматического контроля и регулирования технологических процессов, принципами работы и устройством наиболее важных измерительных приборов, областями их применения и основами монтажа и эксплоатации.

В соответствии с этой целевой установкой курса в книгу не вошли сведения о методах расчета и конструирования измерительных приборов и их деталей. Отдельные расчетные данные приводятся лишь в тех случаях, когда они необходимы для лучшего уяснения свойств и особенностей прибора или если прибор, будучи достаточно простым, может быть изготовлен на месте.

Равным образом теоретические сведения, обосновывающие методы измерений или порядок работы прибора, сведены к минимуму, так как большая часть этих сведений должна быть известна студентам из пройденных теоретических и общетехнических дисциплин.

За счет максимального сокращения этих разделов, не столь необходимых для эксплоатационника, в книге освещены, насколько позволяет ее объем, вопросы монтажа, налаживания и эксплоатации приборов.

Книга содержит описание приборов, главным образом, отечественного производства. Приборы иностранного происхождения описываются в тех случаях, когда они широко применяются в нашей практике или когда при отсутствии аналогичного отечественного прибора данный иностранный образец представляет принципиальный интерес.

Ограниченность объема курса исключает возможность исчерпывающе полного освещения существующих видов контрольно-измерительных и регулирующих приборов. Поэтому в книге описаны лишь основные, типовые приборы промышленного автоматического контроля. Сознательно исключены приборы лабораторного и переносного типа (за очень редкими исключениями), применяемые при отдельных технических испытаниях, а также при лабораторных и исследовательских работах.

Приборы, описанные в данной книге, сгруппированы по признаку их назначения, а внутри каждой группы классифицированы по методам измерений и конструктивным особенностям.

Содержание книги распадается на четыре части:

I. Приборы для измерения давления, количества материалов и их расхода.

II. Приборы для измерения температуры.

III. Приборы для определения состава и качества материалов.

IV. Приборы автоматического регулирования.

Материал, содержащийся в книге, может служить пособием и по курсу контрольно-измерительных приборов в химико-технологических вузах и техникумах. Для последних материал, набранный петитом, не является обязательным.

Автор полагает, что содержание книги, посвященное приборам контроля и управления технологическими процессами химических производств, представит интерес и может принести известную пользу не только в качестве учебника, но и пособия в практической деятельности инженеров химической промышленности.

Автор полагает, что книга, будучи первой из учебных пособий по этому вопросу, вряд ли свободна от недочетов и заранее выражает свою признательность читателям, которые сообщат ему о замеченных недостатках и погрешностях.

Автор.

ВВЕДЕНИЕ

Контроль технологических процессов лежит в основе управления химическим производством. Без ясного представления о ходе процесса и отклонениях его от нормы невозможно поддерживать установленный технологический режим и обеспечить наилучшие результаты производства. Крупные масштабы современных химических производств, огромные количества единовременно перерабатываемого вещества, большие скорости химических процессов и их чувствительность к отклонению от оптимальных условий предъявляют жесткие требования к организации и качеству контроля.

Только непрерывный высококачественный контроль, дающий в любой момент, без запаздывания и ошибок, полную картину технологического процесса, может обеспечить максимальную производительность, безаварийность, минимальные расходные коэфициенты и наибольшие выходы стандартного продукта.

Непрерывность и своевременность контроля достижимы с помощью автоматических приборов, выполняющих необходимые определения и измерения без участия человека. Поэтому на автоматические контрольно-измерительные приборы стремятся возложить как можно больше контрольных операций, оставляя на долю лабораторий поверочные анализы и те операции, для выполнения которых еще нет надежно действующих автоматов.

Технологические схемы многочисленных химических производств, при всем их многообразии, складываются из сравнительно небольшого числа физико-химических процессов, ход которых в свою очередь определяется немногими физическими величинами, так называемыми параметрами процесса.

Таким образом, измерению и контролю подлежит немногочисленная группа физико-химических величин, которые определяют течение производственного процесса.

Кроме основных параметров, управляющих течением процесса, измерению и контролю подлежат величины, характеризующие состояние или качество веществ, участвующих в процессе или являющихся его продуктами. Контроль этих величин необходим для суждения о результатах процесса, а часто и для управления им в тех случаях, когда ход процесса зависит не только от внешних условий, но и от состава или концентрации участвующих в процессе веществ.

Для действенности контроля и удобства его выполнения контрольно-измерительные приборы должны удовлетворять требованиям, главные из которых сводятся к следующему.

1) Прибор должен быть надежным и долговечным в условиях эксплоатации.

2) Измерение данного параметра должно выполняться прибором непрерывно или через достаточно малые промежутки времени с тем, чтобы между двумя последовательными измерениями величина параметра не могла резко отклониться от нормы.

3) Прибор должен действовать автоматически, т. е. не нуждаться в каких-либо манипуляциях для выполнения измерения.

4) Прибор должен обеспечить непрерывную автоматическую запись показаний для того, чтобы было возможно их сопоставить и проанализировать с целью вскрытия причин нарушения режима процесса.

5) Прибор должен быть способен передавать свои показания на расстояние, так как это позволяет сосредоточить указывающие части приборов в одном месте в порядке наиболее удобном для обозрения, что значительно улучшает и упрощает управление процессом.

6) Прибор должен выполнять измерение с необходимой точностью, которая должна сохраняться продолжительное время.

Современные контрольно-измерительные приборы можно разделить на следующие основные типы:

а) *Указывающие приборы*, дающие результаты измерений каким-либо подвижным указателем на шкале. Приборы этого типа являются наиболее простыми, но они не позволяют установить изменение параметра в предшествующее наблюдению время, почему и требуют систематической записи показаний наблюдателем. Систематичность и точность записей всецело зависят от внимательности и добросовестности наблюдателя.

б) *Регистрирующие приборы*, выполняющие автоматическую непрерывную запись показаний. Регистрирующие приборы изготовляются с указательной частью, позволяющей легко устанавливать значение измеряемой величины в данный момент, а также без указательной части, где текущее значение измеряемого параметра можно установить только по диаграмме, что значительно труднее.

в) *Приборы с дальнодействующим передатчиком;* они имеют указательную и регистрирующую часть на самом приборе и повторяют показания на так называемом вторичном приборе, отнесенном на значительное расстояние, либо устраиваются слепыми, т. е. не имеющими указывающей части, а осуществляющие показания и запись на вторичном приборе.

В соответствии с типами применяемых приборов изменяется система контроля и управления производственным процессом.

По степени совершенства системы контроля и управления производственным процессом можно различать следующие их виды:

а) Местный визуальный контроль с ручным управлением, осуществляемый указывающими контрольно-измерительными приборами, размещенными по местам измерения. Показания приборов наблюдаются работниками, ведущими про-

цесс у отдельных аппаратов. В зависимости от показаний приборов работники у аппаратов осуществляют регулировку процесса.

Простота и дешевизна оборудования этого вида контроля и управления обусловливают его применение в промышленности, несмотря на присущие ему недостатки. Эта система контроля не может дать объективной и полной картины производственного процесса и почти исключает возможность анализа. Регулярность и точность записей показаний приборов полностью зависят от добросовестности наблюдателя. Периодические записи воспроизводят состояние процесса в отдельные моменты, разделенные бо́льшими или меньшими промежутками. Ход процесса в течение времени между записями остается неизвестным. Выполнение контроля на крупных установках сопряжено с значительной затратой энергии и времени на обозрение многочисленных приборов, размещенных в различных местах.

Поэтому местный визуальный контроль мало пригоден для современного химического производства. Подобная система контроля может быть допущена для небольших установок с устойчивым режимом и малым числом точек контроля. Применение в этой системе контроля регистрирующих приборов несколько улучшает ее, но основные недостатки — неудобство и затруднительность обозрения многих рассредоточенных приборов — при этом не устраняются.

б) Централизованная система контроля с ручным управлением процессом, выполняемая приборами с передачей показаний на расстояние. На местах контроля устанавливаются первичные указывающие приборы; вторичные приборы с указывающей и регистрирующей частями сосредоточиваются на центральном щите в порядке наиболее удобном для обозрения и суждения о ходе процесса. Наблюдатель у центрального щита может легко проверять и исправлять действия работников, обслуживающих отдельные аппараты установки. Эта система контроля более удовлетворяет запросам крупных химических производств, но все же не обеспечивает полной плавности хода всей установки вследствие распыленности точек регулировки и управления, находящихся в распоряжении многих работников.

Дальнейшим усовершенствованием этой системы является сосредоточение органов управления на том же центральном щите контроля. При этом первичные контрольно-измерительные приборы могут быть слепыми, снабженными только передатчиками. Весь контроль и управление, сосредоточенные в одном месте, находятся в руках одного квалифицированного работника, который с максимальным удобством и легкостью может руководить работой всей установки. Такая система сокращает до минимума число работников на установке и обеспечивает точную ее работу.

в) Полностью автоматизированная система контроля и управления является наиболее совершенной, устраняющей влияние личных качеств обслуживающего персонала. Эта система является конечным этапом развития системы централизованного контроля и управления. Передача показаний приборов

к центральному посту управления и передача командных импульсов от центрального щита к пунктам регулировки создали предпосылки к объединению этих моментов в единую взаимосвязанную систему.

Правильно спроектированная и выполненная автоматическая система контроля и управления с совершенной точностью выдерживает заданный режим, устраняя всякую возможность ошибок, так как система взаимной блокировки отдельных автоматов исключает случайную или умышленную неправильность или опасную комбинацию. Эта система контроля и управления особенно желательна и ценна в установках, работающих под высоким давлением или перерабатывающих взрывоопасные или сильно ядовитые вещества, т. е. там, где ошибка или недосмотр могут повести к весьма тяжелым последствиям.

Конечно, полностью автоматизированная система контроля и управления применима только к установкам с непрерывным процессом производства. В установках периодического действия возможна лишь полуавтоматическая система, в которой автоматом регулируется рабочий цикл аппарата или установки, промежутки же между рабочими периодами устанавливаются ручным способом. Основным звеном всякой системы контроля и управления является *контрольно-измерительный прибор.*

Контрольно-измерительный прибор представляет собою устройство, предназначенное для непрерывного измерения какого-либо параметра, характеризующего либо состояние среды (вещества), либо самую среду (вещество), либо, наконец, количество вещества и положение уровня жидкости или сыпучего материала.

Состояние среды или вещества в химическом производстве характеризуется тремя параметрами: *давлением, температурой* и *концентрацией.* Сама же среда или вещество может характеризоваться чрезвычайно большим числом показателей: плотностью, вязкостью, степенью кислотности и щелочности, цветностью, величиной электропроводности и теплопроводности, лучепреломлением, диффузионной способностью, химическим составом и другими показателями.

В производственном контроле каждого технологического процесса следует выбирать для наблюдения минимальное количество параметров состояния и природы вещества, необходимое для уверенного руководства процессом. Это обусловливается, с одной стороны, необходимостью обеспечить наибольшую простоту и легкость контроля, так как наблюдение и сопоставление слишком большого числа параметров затрудняет выводы и может даже повлечь за собой ошибки. С другой стороны, следует выбирать для измерения минимальное число величин из технико-экономических соображений, так как для каждого измеряемого параметра необходим особый контрольно-измерительный прибор и чрезмерное их количество увеличивает первоначальные и эксплоатационные затраты производства.

Различие параметров, подлежащих измерению и контролю, в связи с разнообразием сред и эксплоатационных требований,

создало обширную номенклатуру контрольно-измерительных приборов, отличающихся по принципу работы и конструкции.

Независимо от многообразия типов контрольно-измерительных приборов возможно установить некоторые черты, общие для всех приборов. Любой из контрольно-измерительных приборов, за исключением самых простых, содержит следующие основные узлы или части: воспринимающую часть, передаточный механизм и указывающую часть.

Воспринимающая часть прибора, называемая также датчиком, представляет собой наиболее существенную его часть. Этот узел прибора наиболее разнообразен и определяет индивидуальное назначение прибора. Воспринимающая часть прибора непосредственно соприкасается или окружена контролируемой средой, реагируя на изменения измеряемого параметра среды. Назначение воспринимающей части — преобразовать величину измеряемого параметра в иную величину или импульс, способные вызвать перемещение указателя по шкале.

Обычно величина измеряемого параметра преобразуется воспринимающей частью прибора в линейное или угловое перемещение какой-либо детали воспринимающей части, или в электрический импульс. Это перемещение или электрический импульс посредством передаточного механизма, увеличивающего перемещение или усиливающего импульс, передается указывающей части прибора. Указывающая часть при помощи указателя того или иного вида отмечает на шкале числовое значение величины измеряемого параметра. К указывающей части прибора следует отнести регистрирующий механизм, записывающий на бумажной ленте, диске или фотобумаге последовательные значения измеряемого параметра в виде сплошной или пунктирной линии или заштрихованной полосы. Изложенная принципиальная схема устройства контрольно-измерительного прибора в отдельных случаях претерпевает некоторые изменения, не нарушающие, однако, ее основ.

В некоторых измерительных приборах воспринимающая часть вызывает настолько значительные перемещения или импульсы, что отпадает необходимость в устройстве специального передаточного механизма; в этих случаях воспринимающая часть непосредственно связывается с указателем.

В других случаях импульсы, создаваемые воспринимающей частью, настолько слабы, что для передвижения указателя или осуществления записи нужен посторонний источник энергии, что требует развития и усложнения передаточного механизма прибора.

Наконец, в дальнодействующих приборах передаточный механизм вырастает в особую систему, состоящую из передатчика, линии связи и приемника.

Из всех частей контрольно-измерительного прибора наибольшим разнообразием отличается воспринимающая часть, так как она должна быть приспособлена к измерению того или иного параметра и различным свойствам сред. Устройство воспринимающей части полностью определяет тип и назначение прибора. Передаточные механизмы и указывающие части укладыва-

ются в сравнительно небольшое количество конструктивных типов и не могут служить признаком, характеризующим прибор.

Очень часто одно и то же указывающее устройство может служить для измерения самых различных параметров. Например, гальванометр может служить в качестве указывающей части при измерении температуры, давления, концентрации, расхода, цветности и т. д. Поэтому классификация контрольно-измерительных приборов по устройству их отдельных частей не целесообразна и неопределенна. Наиболее естественна классификация контрольно-измерительных приборов по их назначению, т. е. по измеряемому параметру. Дальнейшее деление полученных классов приборов на группы и подгруппы может итти прежде всего по методу измерения и далее по устройству прибора. Эта классификация принята в дальнейшем изложении.

Успешная работа контрольно-измерительного прибора зависит от удачного выбора прибора для данного случая измерения, от правильности его установки, качества наладки и ухода за ним.

На эти обстоятельства следует обращать самое серьезное внимание, так как ошибки и недосмотры могут повлечь за собой плохую работу прибора и преждевременную его порчу.

Выбор прибора из ряда подобных по назначению должен производиться с тщательной оценкой эксплоатационных условий, свойств контролируемой среды и требований технологического процесса. Монтаж приборов должен выполняться с соблюдением всех правил, предписываемых инструкцией, прилагаемой обычно к прибору, и, кроме того, должен обеспечить прибор от вредного влияния окружающей атмосферы. Особенно важна защита прибора от пыли и агрессивных газов и паров, зачастую присутствующих в атмосфере химических цехов.

Установленный действующий прибор должен находиться под непрерывным наблюдением и подвергаться периодической проверке. От качества ухода зависит точность показаний и долговечность прибора. Поэтому уход за контрольно-измерительными приборами должен быть поручен достаточно квалифицированному работнику. К вопросу о точности измерений следует подходить критически, оценивая особенности и действительные запросы производственного процесса. Не следует забывать, что достижение высокой точности требует такого усложнения методов и приборов, что полученные результаты не будут оправданы экономически.

С точки зрения производственного контроля более ценным будет простой, надежный и долговечный, хотя и менее точный прибор, чем очень точный, но сложный и хрупкий.

От приборов производственного контроля в первую очередь следует требовать длительного постоянства показаний и выносливости иногда в очень тяжелых условиях эксплоатации. В отношении точности измерений в подавляющем большинстве случаев производственного контроля достаточно, чтобы величина погрешности не превышала $\pm$ 2% измеряемой величины.

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

ИЗМЕРИТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ, КОЛИЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ И ИХ РАСХОДА

ГЛАВА I

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ, КОЛИЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ И ИХ РАСХОДА

1. Общие сведения

Техника химического производства имеет в своей основе разнообразные химические реакции, протекающие между веществами в определенных количественных соотношениях. Поэтому измерение количества или расхода веществ, участвующих в технологических процессах химических производств, играет очень важную роль, являясь не только средством контроля результатов, но и одним из основных факторов управления ходом производственного процесса.

Многообразие процессов химических производств приводит к необходимости измерения количества и расхода материалов в любом агрегатном состоянии: газообразном, жидком и твердом.

Измерение количества вещества в конечном итоге сводится к определению его веса, однако в практике очень часто прибегают к измерению объема, от которого пересчетом легко перейти к весовым единицам. При измерении количества газа преимущественно пользуются объемным методом, а также используют для характеристики количества, концентрации или расхода газа измерение его давления.

Таким образом, измерение давления дает количественную оценку участвующим в технологическом процессе газам и парам и поэтому часто имеет важное значение в химических производствах. Однако помимо этой роли указателя, давление само по себе является в химических производствах важнейшей величиной как фактор технологического процесса, определяющий его результат и скорость. В силу этого измерение и регулирование давления может часто определять правильность и успех процесса химического производства.

Измерение давления используется также и как контрольный фактор для проверки напряжений, возникающих в сильно нагруженных деталях химических машин (давление на подшипники осей смесительных валков, каландров и др.). Таким образом, и при измерении давления приходится иметь дело с любой из трех агре-

гатных форм, т. е. измерять давления газа или пара, жидкости и твердого тела.

К вспомогательным контрольным операциям, дающим количественную оценку содержанию или расходу жидкостей и твердых сыпучих тел, принадлежит измерение их уровня. В ряде случаев измерение уровня играет весьма важную роль в химических производствах. Достаточно указать, например, на случаи измерения уровня жидкости в реакторах, перегонных кубах, выпарных аппаратах и т. п. Измерение уровня жидкостей применяется также с целью определения количества продуктов или полупродуктов, хранящихся в резервуарах и цистернах, и с целью избежания потерь продукта от переполнения расходных баков, сборников и других аппаратов.

Измерения, о которых идет здесь речь, производятся с помощью приборов, описанных в части первой книги. В порядке последовательности изложения эта часть содержит описание измерителей давления, уровня, весовых и объемных измерителей количества и расхода материалов и так называемых дросселирующих измерителей расхода жидкости и газов.

2. Единицы измерения давления

Давление есть действие силы, равномерно распределенной по площади.

Единицей давления является действие единицы силы (нагрузки), равномерно распределенной по единице площади.

В системе CGS единица давления есть действие равномерно распределенной силы в 1 дину, испытываемое плоской поверхностью в 1 $см^2$. Эта единица носит название барии или микробара и обозначается обычно буквой *б*.

В системе MKS единица давления есть действие на 1 $м^2$ равномерно распределенной силы в 1 *кг* (обозначается $кг/м^2$). В системе MTS единицей давления является пьеза — давление, испытываемое площадью в 1 $м^2$ под действием равномерно распределенной силы в один стен; пьеза обозначается буквами *пз*.

Перечисленные единицы давления не применяются в технических измерениях из-за их малой величины, делающей пользование ими неудобным. В технике используются более удобные единицы измерения давления. Такими практическими единицами давления являются атмосфера физическая, атмосфера техническая; миллиметр ртутного столба, миллиметр и метр водяного столба.

Физическая атмосфера — одна из первых единиц измерения давлений, введенная в науку и технику, представляет собою давление воздушного столба земной атмосферы на уровне моря.

Физическая атмосфера является величиной, изменяющейся во времени, так как атмосферное давление колеблется в значительных пределах. Поэтому величина физической атмосферы была

принята условно равной давлению, которое производит на горизонтальную плоскость вес столба ртути высотою 760 *мм* при плотности ртути 13,5951 *г/см*^{3} (при 0°С) и при ускорении силы тяжести в 980,665 *см/сек*^{2}. В настоящее время пользование физической атмосферой в технических измерениях официально не допускается.

Техническая атмосфера — это давление, испытываемое поверхностью в 1 *см*^{2} от действия равномерно распределенной силы в 1 *кг*; обозначается размерностью *кг/см*^{2}.

Миллиметры ртутного столба — давление, испытываемое плоской поверхностью в 1 *см*^{2} от столба ртути в 1 *мм* высотой при плотности ртути в 13,5951 *г/см*^{3} (при 0°С) и ускорении силы тяжести в 980,665 *см/сек*^{2}.

Миллиметры и метры водяного столба — единицы, вполне аналогичные миллиметрам ртутного столба, с той лишь разницей, что нагрузка производится столбом воды при 4°, т. е. при плотности воды, равной 1,0 *г/см*^{3}.

Перечисленные единицы давления легко связываются друг с другом простыми соотношениями. Так, физическая атмосфера, равная 760 *мм* рт. ст., легко может быть выражена в единицах *кг/см*^{2}. Действительно, вес ртутного столба высотою 760 *мм*, площадью основания 1 *см*^{2} будет равен:

$$76 \times 13{,}5951 = 1033{,}3 \text{ г},$$

а следовательно, физическая атмосфера соответствует давлению 1,0333 *кг/см*^{2} или 1,0333 технической атмосферы. С другой стороны, техническая атмосфера, выраженная в *мм* ртутного столба, равна 735,56 *мм* рт. ст.

В Англии и США принята единица давления в один английский фунт на квадратный дюйм. Эта единица в СССР не применяется.

Соотношение всех упомянутых единиц давления для удобства перехода от одной к другим дается в табл. 1.

Таблица 1

Соотношения различных единиц давления

Единицы давления	Техническая атмосф. *кг/см*^{2}	Гектопьеза или бар, гпз	Физическая атмосфера	*мм* ртутного столба	*м* водяного столба	анг. фунт/кв. дюйм
кг/см^2	1,0000	0,9806	0,9678	735,56	10,000	14,223
гпз	1,0197	1,0000	0,9869	750,06	10,197	14,504
физ. атм.	1,0333	1,0132	1,0000	760,00	10,333	14,696
мм рт. ст. . . .	0,00136	0,00133	0,00131	1,0000	0,0136	0,01931
м вод. ст.	0,1000	0,0980	0,0968	73,556	1,0000	1,4223
анг. фунт/кв. дюйм	0,0703	0,0689	0,0680	51,715	0,703	1,0000

Давление абсолютное и избыточное. В различных случаях измерения давлений нас может интересовать величина полного, или абсолютного давления, или величина избыточного, или относительного давления.

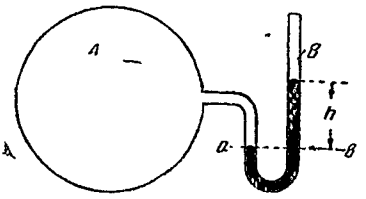


Рис. 1. Схема измерения давления:
A — сосуд с измеряемым давлением; B — U-образная трубка.

Допустим, что в сосуде A (рис. 1) находится газ под некоторым давлением p. Сосуд A соединен с U-образной трубкой B, частично заполненной ртутью. Если давление p внутри сосуда выше атмосферного p_0, то под действием большего давления внутри сосуда ртуть в левом колене трубки B опустится, а в правом поднимется на некоторую высоту.

Рассматривая условия равновесия в плоскости ab, можно написать:

$$p = h\gamma + p_0, \tag{1}$$

т. е. полное или абсолютное давление p внутри сосуда равно давлению, отсчитанному по манометру, плюс атмосферное (барометрическое) давление.

Обозначая:

$p_а$ — давление абсолютное;

$p_б$ — давление барометрическое и

$p_и$ — давление избыточное (манометрическое), предыдущую формулу можно написать в виде:

$$p_а = p_и + p_б \tag{2}$$

или

$$p_и = p_а - p_б, \tag{3}$$

т. е. манометрическое, или избыточное, давление равно разности абсолютного и атмосферного давления. Измерение манометром всегда дает величину избыточного сверх атмосферного давления.

Если давление в сосуде меньше атмосферного, уровень ртути будет стоять выше в левом колене и условие равновесия запишется в форме:

$$p = p_0 - h\gamma \tag{4}$$

или

$$p_а = p_б - p_h, \tag{5}$$

где p_h — давление, измеренное вакуумметром.

В промышленной измерительной практике в подавляющем большинстве случаев представляет интерес и измеряется избыточное давление.

Для получения значений абсолютного давления к показанию манометра необходимо добавить величину атмосферного давления или, что то же, показание барометра.

3. Единицы измерения количества и расхода материалов

Весовыми единицами измерений в химических производствах обычно принимаются килограмм (*кг*) и тонна ($т=1000$ *кг*). Значительно реже применяется в качестве единицы измерения метрический центнер ($ц=100$ *кг*).

Измерения в долях килограмма и граммах встречаются как редкое исключение.

Объемными единицами измерения являются литр (*л*) и кубический метр ($м^3=1000$ *л*).

Следует различать измерение количества, выражающееся в весовых или объемных единицах, и измерение расхода, имеющего размерность количества в единицу времени: *кг/сек*; *т/час*; *л/сек*; $м^3$/*час* и т. п.

Пересчет единиц объема в единицы веса может быть произведен при известном переводном коэфициенте γ в формуле:

$$G=\gamma V, \qquad (6)$$

где G — вес в *кг* или *т*;

V — объем в *л* или $м^3$.

Коэфициент пересчета γ выражает вес единицы объема материала, т. е. имеет размерность в технической системе мер $\gamma=кг/м^3$.

Этот коэфициент носит название плотности или удельного веса; для твердых сыпучих тел γ носит название насыпного, или объемного, веса, который не следует смешивать с удельным весом твердого тела. Насыпной, или объемный, вес всегда меньше удельного веса из-за наличия пустот между частицами материала, заполняющего данный объем.

Насыпной вес твердого сыпучего материала не имеет для данного вещества постоянного значения, чем также отличается от плотности или удельного веса. Насыпной вес зависит от гранулометрического состава сыпучего материала, т. е. от размера частиц и количественного содержания частиц различной величины в общей массе сыпучего материала.

Колебания в величине насыпного веса приводят к тому, что определение количества сыпучего материала предпочтительнее выполнять взвешиванием для получения более точных результатов.

Количество жидкости с равной степенью точности может быть измерено и весовым и объемным методом, так как удельный вес жидкости является постоянной величиной, характерной для каждой данной жидкости.

Объемный метод измерения количества жидкости применяется значительно чаще, чем весовой, так как приборы для измерения объема конструктивно проще и дешевле автоматических приборов для измерения веса.

Измерение количества газа выполняется исключительно объемным методом; весовые приборы для измерения количества газа не получили распространения.

При пересчете измерения объема жидкости в весовые единицы необходимо учитывать температуру измеряемой жидкости, так

как величина удельного веса сильно изменяется с изменением температуры.

Удельные веса жидкостей в физических таблицах даются безразмерными единицами, выражающими относительный вес жидкости в единице объема по сравнению с весом воды при 4°, принятым за единицу. Единица удельного веса равна в технической системе измерения 1000 *кг/м*³.

Зависимость удельного веса γ жидкости от температуры выражается формулой:

$$\gamma_t = \frac{\gamma_0}{1+\beta t}, \tag{7}$$

где β — объемный коэфициент расширения;

γ_0 — удельный вес жидкости при 0°;

γ_t — удельный вес жидкости при t°.

При точных измерениях следует принимать во внимание кроме изменения удельного веса также изменение объема измерительного сосуда от нагревания. Подробнее об этом сказано ниже.

Количество газа обычно измеряется и указывается в объемных единицах. При измерении объема необходимо привести измеренный объем газа к нормальным температуре и давлению (0° и 760 *мм* рт. ст.), так как иначе измерения будут несравнимыми и результаты их недостоверными.

Для приведения объема газа к нормальным условиям, которыми приняты температура 0° и давление 760 *мм* рт. ст., используется формула, основанная на законах Бойля-Мариотта и Гей-Люссака:

$$V_0 = V\frac{273}{273+t}\cdot\frac{p}{760} = 0{,}359\ V\frac{p}{T}, \tag{8}$$

где V_0 — приведенный объем;

V — измеренный объем при температуре t и давлении p (в *мм* рт. ст.);

t — температура в °С;

T — температура в °К.

Чтобы произвести перерасчет в весовые единицы, необходимо привести к нормальным условиям и плотность газа. Если при температуре t°С и давлении p *мм* рт. ст. плотность газа равна γ_t то приведенную плотность γ_0 можно определить из следующей формулы:

$$\gamma_0 = \gamma_t\frac{273+t}{273}\cdot\frac{760}{p} = 2{,}78\ \gamma_t\frac{T}{p}. \tag{9}$$

Вес газа будет равен:

$$G = V_0\gamma_0. \tag{10}$$

На плотность газа заметно влияет содержание влаги, поэтому при точных измерениях следует учитывать влагосодержание. Плот-

ность влажного газа, приведенная к нормальным условиям, определяется по формуле:

$$\gamma_t = \gamma_0 \frac{p - p_1}{760} \cdot \frac{273}{273 + t} + \varphi \frac{\gamma_н}{1000}, \qquad (11)$$

где p — давление газа в *мм* рт. ст.;

p_1 — давление водяного пара при данном влагосодержании в *мм* рт. ст.;

φ — относительная влажность в %;

$\gamma_н$ — плотность водяного пара при насыщении газа влагой при температуре и давлении p.

Величина ошибки от пренебрежения поправкой на содержание влаги может достичь при 100% относительной влажности 5%, что недопустимо при сколько-нибудь точных измерениях.

64969

КИНСКАЯ ОБЛАСТНАЯ
Б И Б Л И О Т Е К А
РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕС-
КАЯ БИБЛИОТЕКА
ИНВ. БССР 14613

РЕСПУБЛИКАНСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕС-
КАЯ БИБЛИОТЕКА
БССР

ГЛАВА II

МАНОМЕТРЫ

4. Классификация измерителей давления

Приборы для измерения давления носят общее название манометров.

В различных химических производствах могут иметь значение и подлежать измерению давления, начиная от долей миллиметра ртутного столба и кончая тысячами килограммов на 1 $см^2$. Такой огромный диапазон измеряемых давлений, а также специфичность измерений в различных технологических условиях требуют применения измерительных приборов, весьма различных как по принципам работы, так и по устройству.

Разнообразные приборы для измерения давления могут быть сведены в четыре основные группы, различающиеся по принципам работы:

1) Жидкостные манометры, измеряющие давление высотой столба жидкости.

2) Поршневые манометры, в которых измеряемое давление уравновешивается силой, действующей на поршень определенной площади.

3) Пружинные манометры, измеряющие давление по величине деформации упругого тела.

4) Электрические манометры, преобразующие давление в какую-либо электрическую величину, измеряемую электрометрическими методами.

Классификация приборов для измерения давлений может также основываться на их назначении. По признаку назначения приборы для измерения давления разделяются на:

Манометры — или приборы для измерения давления выше атмосферного.

Вакуумметры — приборы для измерения давления ниже атмосферного.

Тягомеры — приборы для измерения очень небольших отклонений от атмосферного давления в сторону избыточного давления или вакуума, не превышающих $\pm$ 30 *мм* вод. ст.

Дифференциальные манометры — приборы для измерения разности двух давлений.

Барометры — приборы для измерения атмосферного давления.

Следует отметить, что такое деление научно не обосновано, ибо сама по себе абсолютная величина измеряемого давления, не

вносит никакого принципиального различия в сущность прибора.

В дальнейшем изложении мы будем придерживаться первой системы классификации.

5. Простые жидкостные манометры

Простейшими видами жидкостных манометров являются вертикальные трубки, в которых отсчитывается высота столба жидкости, уравновешивающего измеряемое давление. Манометрические трубки могут быть двухколенчатыми (U-образный манометр) и одноколенчатыми (чашечный манометр).

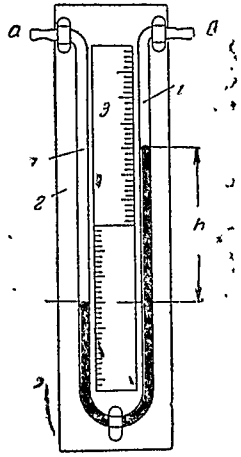


Рис. 2. U-образный манометр: *1* — U-образная трубка; *2*—основная доска; *3* — шкала.

U-образный манометр. U-образный манометр (рис. 2) состоит из стеклянной трубки *1*, изогнутой в виде буквы U. Трубка укреплена на доске *2*. Между вертикальными ветвями трубки на той же доске закреплена шкала *3*. Трубка примерно до половины заполнена какой-либо жидкостью (ртуть, вода, керосин и т. п.).

Прибор располагают в строго вертикальном положении (по отвесу) и конец *а* трубки *1* соединяют с пространством, давление в котором подлежит измерению. Если это давление выше атмосферного, то под его действием жидкость в левом колене опустится, а в правом поднимется. Равновесие будет достигнуто, когда давление столба жидкости в правом колене сравняется с измеряемым давлением в левом.

Равновесие давлений в трубке может быть выражено уравнением:

$$p_a f = p_б f + h\gamma f, \qquad (12)$$

где p_a — абсолютное давление в измеряемом пространстве;

$p_б$ — давление атмосферы;

f — площадь сечения трубки;

h — разность уровней жидкости в обоих коленах;

γ — удельный вес жидкости.

Из уравнения (12) имеем:

$$p_a - p_б = h\gamma,$$

но так как $p_a - p_б = p_и$, т. е. избыточному давлению, предыдущее равенство можно записать в виде

$$p_и = h\gamma, \qquad (13)$$

т. е. избыточное давление равно высоте столба жидкости, умноженной на удельный вес жидкости.

Если измеряемое давление ниже атмосферного, то жидкость в трубке манометра переместится в обратном направлении и высота столба жидкости будет измерять разрежение (вакуум). Таким

образом, этот прибор может измерять избыточное давление и вакуум, т. е. этот прибор является манометром и вакуумметром.

Из формулы (13) следует, что измеряемое давление прямо пропорционально высоте столба жидкости и ее плотности и не зависит от геометрических размеров (диаметра) трубки.

Для отсчета высоты столба жидкости в случае точно калиброванной трубки, т. е. трубки, сечение которой точно одинаково по всей длине, достаточно было бы определить высоту подъема или снижения жидкости в одном колене и затем удвоить найденную величину. Но так как практически получить строго цилиндрическую трубку равного сечения по всей длине невозможно, необходимо делать два отсчета: снижение в одном колене и высоту подъема в другом колене и суммировать отсчитанные величины.

Точность измерений U-образным манометром определяется следующим образом.

Абсолютная ошибка измерения может быть найдена как полный диференциал выражения (13):

$$dp = \gamma\, dh + h\, d\gamma. \qquad (14)$$

Относительную ошибку измерения можно выразить отношением этого диференциала к самой функции:

$$\frac{dp}{p} = \frac{\gamma dh}{\gamma h} + \frac{h d\gamma}{\gamma h}; \qquad (15)$$

произведя сокращение, получим:

$$\frac{dp}{p} = \frac{dh}{h} + \frac{d\gamma}{\gamma}, \qquad (16)$$

т. е. относительная ошибка измерения давления равна сумме относительных ошибок измерения высоты столба жидкости и плотности жидкости.

При отсчете высоты столба невооруженным глазом в зависимости от характера мениска, расположения и устройства шкалы и опытности наблюдателя ошибка может достигать 0,5—1,0 *мм*. При зеркальной шкале, устраняющей ошибку от параллакса, ошибка наблюдения может быть снижена до 0,25—0,5 *мм*.

Плотность жидкостей, наиболее часто применяемых для наполнения манометров (ртуть, вода, спирт), хорошо известна (в химически чистом виде) и может быть получена из таблиц с 4—5 десятичными знаками, так что относительная ошибка от неточности определения плотности не превзойдет 0,01—0,001%.

Относительная ошибка от неточности определения высоты столба при ее значении в 1000 *мм* будет колебаться

$$\text{от } \frac{0{,}25}{1000} \cdot 100 = 0{,}025\% \text{ до } \frac{1{,}0}{1000} \cdot 100 = 0{,}1\%.$$

При высоте столба в 100 *мм* относительная ошибка возрастет в 10 раз, т. е. составит от 0,25 до 1,0%.

Таким образом, точность измерения U-образным манометром прямо пропорциональна величине измеряемого давления. Чем меньше измеряемое давление, тем меньше точность измерения. Поэтому для измерения малых давлений (меньше 150 *мм* вод. ст.) следует применять жидкостные манометры специальных типов, позволяющие получить достаточную точность.

При точном измерении давлений жидкостными манометрами необходимо вводить поправки на величину ускорения силы тяжести и на температуру, так как при установлении единиц давления учитывались определенные температура и величина ускорения силы тяжести.

Поправка на величину ускорения силы тяжести выражается формулой:

$$h_n = h_1 \frac{g_1}{g_n}, \qquad (17)$$

где h_n — высота столба жидкости при нормальном ускорении;
h_1 — наблюденная высота столба жидкости;
g_1 — величина ускорения силы тяжести в данной местности;
g_n — нормальная величина ускорения силы тяжести, равная 980,665 *см/сек*^{2}.

Поправка на температуру включает в себя поправки на зависимость плотности жидкости от температуры и изменение длины шкалы от расширения.

В целом температурная поправка выражается формулой:

$$h_0 = h_t \frac{1 + \alpha t}{1 + \beta t}, \qquad (18)$$

где h_0 — высота столба жидкости при нормальной температуре (для ртути 0°; для воды 4°);
h_t — наблюденная высота столба жидкости при температуре t;
α — коэфициент линейного расширения материала шкалы;
β — коэфициент объемного расширения жидкости.

Поправки на ускорение и на температуру могут достигать значительных величин (порядка 2—3 *мм*) и пренебрегать ими при точных измерениях отнюдь не следует.

U-образный манометр, как и вообще жидкостные манометры, является, при учете поправок и принятии мер к уменьшению ошибок измерения высоты столба, весьма точным прибором, который можно и следует применять во всех случаях, когда требуется определить величину давления с большой точностью.

Чашечный манометр. Чашечный манометр отличается от U-образного тем, что одно колено трубки заменено сосудом большого диаметра. Соединяя этот сосуд с пространством, в котором необходимо измерить давление, можно судить о величине давления по высоте столба жидкости в трубке манометра.

Шкала манометра устанавливается так, чтобы нуль шкалы совпадал с первоначальным уровнем жидкости в сосуде; величина

давления определяется одним отсчетом положения мениска жидкости в трубке.

Такой способ отсчета весьма удобен, однако он влечет за собой некоторую ошибку, зависящую от смещения уровня жидкости в сосуде, вследствие чего положение нуля шкалы не совпадает с уровнем жидкости в сосуде и отсчитанное давление меньше истинного на величину отношений сечений трубки и сосуда манометра.

Если обозначить через h отсчитанную высоту столба жидкости по шкале манометра, h_g — действительную высоту столба жидкости, f — площадь сечения трубки манометра и F — площадь сечения сосуда, то:

$$h_g = h\left(1+\frac{f}{F}\right). \qquad (19)$$

Если отношение $\frac{f}{F}$ взять достаточно малым, то ошибка измерения давления будет также невелика и для большей части практических случаев может не приниматься во внимание.

Для обеспечения большей точности шкала чашечного манометра может быть градуирована с учетом понижения уровня жидкости в сосуде манометра или шкала делается подвижной, позволяющей совмещать в момент отсчета нуль шкалы с действительным уровнем жидкости в сосуде.

Для чашечного манометра, так же как для U-образного, должны учитываться поправки на величину ускорения силы тяжести и температуру.

Манометры с наклонной трубкой. При измерении малых давлений, порядка миллиметров или десятков миллиметров водяного столба, относительная ошибка от неточности отсчета становится весьма значительной.

Например, при измерении давления в 10 *мм* ошибка отсчета положения мениска в 0,5 *мм* составляет относительную ошибку, равную 5% измеряемой величины.

Поэтому для измерения малых давлений приходится применять приборы, обеспечивающие большую точность, нежели обычные U-образный или чашечный манометры. Эти приборы носят название микроманометров или тягомеров. К числу их относятся манометр с наклонной трубкой, называемый тягомером Крелля, микроманометр ЦАГИ и микроманометр Аскания.

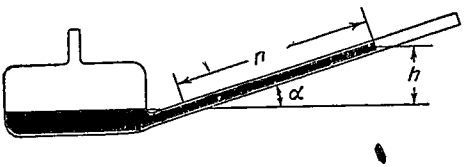


Рис. 3. Схема микроманометра Крелля.

Тягомер Крелля (манометр с наклонной трубкой, рис. 3) состоит из стеклянного сосуда, к которому припаяна стеклянная трубка, наклоненная к горизонту под некоторым углом α. Сосуд с трубкой укреплены на деревянной дощечке, на которой вдоль трубки расположена шкала.

Шкала градуирована в *мм* водяного столба. Для удобства шкала сделана подвижной, чтобы при заполнении прибора жидкостью можно было легко совместить нуль шкалы с мениском жидкости в трубке.

Сосуд имеет патрубок для присоединения манометра к пространству, в котором измеряется давление. В случае измерения давления ниже атмосферного к пространству присоединяется конец трубки 2. Для правильной установки прибора имеется уровень.

Прибор заполняется подкрашенным спиртом (плотность 0,8).

Вследствие наклонного положения трубки высота столба жидкости:

$$h = n \sin \alpha, \tag{20}$$

где n — отсчет по шкале.

Таким образом, цена деления шкалы в $\frac{1}{\sin \alpha}$ раз больше высоты столба жидкости, т. е. 1 *мм* столба жидкости будет выражаться $\frac{1}{\sin \alpha}$ *мм* длины столба жидкости на шкале.

Относительная ошибка измерения данным прибором будет:

$$\frac{dp}{p} = \frac{dn}{n} + \frac{d\gamma}{\gamma} + \frac{d \sin \alpha}{\sin \alpha}, \tag{21}$$

т. е. относительная ошибка прибора складывается из ошибки отсчета, ошибки определения плотности жидкости и ошибки в угле наклона трубки.

Так как абсолютная величина ошибки отсчета по шкале в данном приборе не превышает ошибки в обычном жидкостном манометре, относительная ошибка отсчета будет в $\frac{1}{\sin \alpha}$ раз меньше.

Ошибка в определении плотности жидкости в этом приборе не больше, чем в случае U-образного или чашечного манометра.

Ошибка в угле наклона трубки может быть и производственной и эксплоатационной. Производственная ошибка, т. е. установка трубки при изготовлении прибора не точно по расчету, не повлияет на точность измерения, так как войдет при градуировке в шкалу прибора.

Ошибка эксплоатационная, т. е. неточная установка прибора по горизонтали, может значительно отразиться на точности измерений. Величина этой ошибки помимо субъективной неточности установки прибора будет зависеть от чувствительности уровня, которым снабжен прибор.

Для получения такой чувствительности уровня, при которой перемещение пузырька воздуха в уровне было равно перемещению мениска в трубке тягомера, необходимо, чтобы радиус кривизны уровня находился в следующей зависимости от длины трубки тягомера и угла ее наклона:

$$R = l \operatorname{ctg} \alpha, \tag{22}$$

где R — радиус кривизны трубки уровня в *см*;
l — длина трубки в *см*;
α — угол наклона трубки к горизонту.

Точность тягомера Крелля обычно находится в пределах 2—2,5% от предельного значения шкалы тягомера при правильной установке прибора и заполнении его жидкостью соответственной плотности.

Микроманометр ЦАГИ. Для увеличения диапазона давлений применяются микроманометры с переменным углом наклона. Один из таких приборов — микроманометр ЦАГИ (рис. 4) состоит из цилиндрического металлического сосуда *1*, в одно из донышек которого в металлическую оправу вделана стеклянная трубка *3* со шкалой. Сосуд *1* помещен в цилиндрическую обойму *2*, укрепленную к основанию так, что может вращаться внутри обоймы, причем трубка *3* может располагаться под различными углами к горизонту. К основанию прибора прикреплена стойка *6* с тремя отверстиями, в которые может входить штифт, соединенный с оправой трубки и закрепляющий ее в одном из трех положений, соответствующих величине синусов угла наклона 0,125; 0,250 и 0,50.

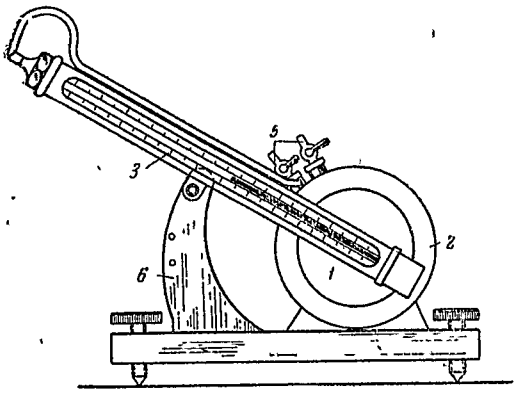


Рис. 4. Микроманометр ЦАГИ:

1 — сосуд; *2* — обойма сосуда; *3* — наклонная трубка; *4—5* — патрубки для подачи давления; *6* — стойка.

Эти значения $\sin\alpha$ отмечены у соответственных отверстий стойки. Кроме того, фиксировано еще вертикальное положение трубки, превращающее прибор в обычный чашечный манометр.

Основание прибора снабжено тремя установочными винтами и двумя уровнями, оси которых перпендикулярны друг к другу, для точной установки прибора в горизонтальной плоскости.

Для наполнения сосуда спиртом отвинчивают патрубок сосуда и наливают спирт до нулевого штриха шкалы.

Микроманометр ЦАГИ изготовляется для давлений

0—160 *мм*	вод. ст. при	$\sin\alpha = 1{,}0$
0—80 „	„ „ „	$\sin\alpha = 0{,}5$
0—40 „	„ „ „	$\sin\alpha = 0{,}25$
0—20 „	„ „ „	$\sin\alpha = 0{,}125$

Рабочая часть шкалы соответственно: 8—160 *мм*; 4—80 *мм*; 2—40 *мм* и 1—20 *мм* вод. ст.

Отношение сечений трубки и сосуда $\frac{F}{f} = 700$.

Полная погрешность отсчета складывается из: неточности определения плотности спирта ($\pm 0{,}125\%$ от измеряемой величины), неточности установки угла наклона ($\pm 0{,}2\%$), понижения уровня жидкости в сосуде (от $\pm 0{,}14$ до 1,12%) и неточности отсчета по шкале ($\pm 0{,}5$ *мм*).

Микроманометр типа Аскания. Микроманометр Аскания — прибор компенсационного типа для измерения положительного (избыточного) и отрицательного давления (разрежения) до 120 *мм* вод. ст. Прибор в основном применяется для проверки тягомеров и микроманометров других типов.

Микроманометр (рис. 5) состоит из двух сосудов *1* и *2*, соединенных резиновой трубкой *3*. Сосуд *1* передвигается по микрометрическому винту *4*, проходящему по оси сосуда *1*. Нижний конец винта опирается в подпятник в корпусе сосуда, а верхний снабжен головкой *5* с кольцевой шкалой *13*.

Сосуд *2* закреплен в станине прибора и может при помощи гайки *6* перемещаться в вертикальном направлении на 3—4 *мм* для корректировки положения нуля. Уровень жидкости в сосуде *2* приводится во время измерения к одной и той же высоте подъемом сосуда *1*. Установка уровня жидкости в сосуде *2* контролируется простым оптическим устройством. Внутри сосуда *2* закреплен металлический конический стержень *7*, с вершиной которого должен быть совмещен уровень жидкости.

Одна из торцевых стенок сосуда *2* выполнена из матового стекла *16*, а другая из линзы *15*. К корпусу сосуда прикреплено плоское зеркало *14*.

В момент соприкосновения поверхности жидкости с вершиной конуса в зеркале наблюдается картина двух конусов, соприкасающихся своими вершинами. Изображение второго конуса является отражением стержня в поверхности жидкости. Точное соприкосновение вершин конусов свидетельствует о приведении уровня жидкости к вершине конического стержня.

Для измерения давления прибор устанавливается по уровню, находящемуся на станине, при помощи установочных винтов. Указатель *8* вертикальной шкалы и указатель *10* кольцевой шкалы на головке прибора устанавливаются на нулевые деления шкал. Сосуды наполняют дестиллированной водой и гайкой *6* приводят уровень воды в сосуде *2* к нулю, т. е. к точному касанию вершин двух конусов в зеркале.

Избыточное (положительное) давление присоединяется к штуцеру *11* сосуда *2*, а разрежение (отрицательное давление) к штуцеру *12* сосуда *1*. Затем вращением головки *5* поднимают сосуд *1*, наблюдая в зеркало *14* момент соприкосновения вершин двух конусов.

Давление уравновешивается столбом воды, высота которого равна разности уровней в сосудах *1* и *2*.

После уравновешивания давлений производят отсчет по обеим шкалам и суммируют их показания.

Вертикальная шкала имеет деления от нуля до 120 *мм* через 2 *мм*, а кольцевая шкала двести делений, цена которых 0,01 *мм*.

Отсчет производится таким образом. По указателю вертикальной шкалы определяется высота столба с точностью до 2 *мм* и к ней прибавляется показание круговой шкалы. Например, указатель вертикальной шкалы стоит между делениями 12 и 14 *мм* — отсчитывается 12 *мм*. Указатель круговой шкалы стоит в это время на делении 134, т. е. показывает 1,34 *мм*. Эта величина прибавляется к показанию вертикальной шкалы и окончательный отсчет будет 13,34 *мм*.

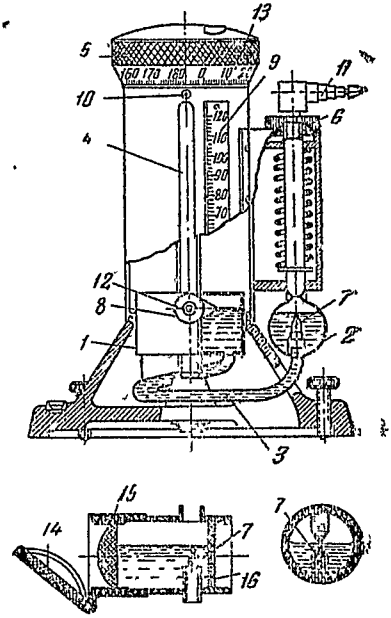


Рис. 5. Микроманометр Аскания:

1—2 — сосуды; *3* — соединительная трубка; *4*—микрометрический винт; *5* — головка микрометрического винта; *6*—установочная гайка; *7* — конический стержень; *8* — указатель вертикальной шкалы; *9*—вертикальная шкала; *10*—указатель круговой шкалы; *11* — штуцер плюсового давления; *12* — штуцер минусового давления; *13* — кольцевая шкала; *14* — зеркало; *15* — линза; *16* — матовое стекло.

Точность прибора в зависимости от навыка наблюдателя колеблется обычно от 0,02 до 0,05 *мм*.

Прибор не пригоден для измерения колеблющихся давлений, так как требует времени для установки и отсчета показаний.

Промышленное применение простых жидкостных манометров ограничено существенными недостатками: хрупкостью, нечеткостью шкалы, затрудняющей чтение показаний, ограниченностью диапазона измерений (до 3 *кг/см*^{2}), затруднительностью передачи показаний на расстояние и сложностью устройств для записи показаний. Поэтому жидкостные манометры применяются, главным образом, в научных или исследовательских работах и для проверки манометров других типов.

6. Усовершенствованные жидкостные манометры

Кольцевые весы. К жидкостным манометрам относятся и приборы для измерения давлений, называемые кольцевыми весами, так как в этих приборах измеряемое давление также уравновешивается столбом жидкости. Основным отличием кольцевых весов от U-образных манометров является способ измерения высоты столба жидкости, уравновешивающего давление. В кольцевых весах высота столба жидкости определяется по величине угла поворота подвижной части прибора. Этот метод измерения столба жидкости, а следовательно, и давления сообщает прибору ряд преимуществ, вызвавших широкое применение его в промышленности для технических измерений небольших давлений.

Кольцевые весы (рис. 6) состоят из металлической трубки *1*, согнутой в замкнутое кольцо. Трубчатое кольцо *1* опирается в своем центре одним или двумя ножами *2* на призму *3*, укрепленную к станине прибора. Кольцо внутри имеет глухую перегородку *4*, по обеим сторонам которой в полость кольца входят трубки *5* и *6*. В нижней части кольца укреплен груз *7*. Полость кольца до половины заполнена жидкостью (ртуть, вода, спирт).

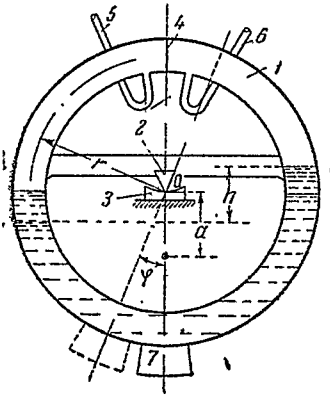


Рис. 6. Кольцевые весы: *1* — кольцевая трубка; *2* — опорные ножи; *3* — опорная подушка; *4* — перегородка кольца; *5* и *6* — трубки для подачи давления; *7* — груз.

Если патрубок *5* соединить с пространством, в котором существует избыточное давление, то уровень жидкости в левой ветви кольца понизится, а в правой повысится до уравновешивания давления столбом жидкости высотой *h*.

Переход части жидкости из левой ветви кольца в правую нарушит равновесие системы, и кольцо начнет поворачиваться вокруг точки опоры *0* по часовой стрелке до тех пор, пока увеличивающийся противодействующий момент груза *7* не уравновесит момент столба жидкости. Система придет в равновесие в новом положении. Условие равновесия можно вывести из следующих соображений.

Момент столба жидкости высотой *h*, стремящийся вращать кольцо вокруг точки опоры, равен:

$$M_{ж} = hf\gamma r, \qquad (23)$$

а момент, противодействующий вращению:

$$M_q = Qa \sin \varphi, \tag{24}$$

где h — высота столба жидкости в *см*;
f — площадь поперечного сечения кольца в $см^2$;
γ — плотность жидкости в $кг/см^3$;
r — радиус кольца в *см*;
Q — вес движущейся системы в *кг*;
a — расстояние центра тяжести системы от точки опоры в *см*;
φ — угол поворота системы.

Система придет в равновесие, когда:

$$M_ж = M_q$$

или

$$hf\gamma r = Qa \sin \varphi. \tag{25}$$

Отсюда:

$$\sin \varphi = \frac{rf}{Qa} h\gamma. \tag{26}$$

Для каждого данного прибора величины r, f, Q и a постоянны, а следовательно, множитель $\frac{rf}{Qa} = K = \text{const}$, с другой стороны, $h\gamma = p$. Таким образом, уравнение (26) можно написать в виде:

$$\sin \varphi = Kp. \tag{27}$$

Следовательно, измеряемое давление пропорционально синусу угла поворота. Прикрепив к вращающемуся кольцу стрелку, двигающуюся по шкале, проградуированной по давлению, можно непосредственно отсчитывать величину давления. Однако при этом деления будут получаться неравномерными. Кроме того, по конструктивным соображениям при ножевой опоре угол поворота кольца нельзя сделать больше 60°, что ограничивает длину шкалы и величину делений. Поэтому указывающую стрелку не соединяют непосредственно с кольцом, а вводят увеличивающую зубчатую передачу и приспособление, выравнивающее шкалу.

Кольцевые весы для измерения давления устраиваются с водяным и ртутным наполнением.

Приборы с водяным наполнением устраиваются со шкалами, имеющими в своем начале нуль для диапазонов измерений 0—25, 0—50, 0—100 и 0—150 *мм* вод. ст. и имеющими нуль посередине шкалы для диапазонов: +12,5—0—12,5, +25—0—25, +50—0—50 *мм* вод. ст.

Кольцевые весы с ртутным наполнением устраиваются для диапазонов 0—500, 0—1000, 0—1500 и 0—2500 *мм* вод. ст.

Точность измерений ± 2,0% от предельного значения шкалы.

Кольцевые весы устраиваются в виде указывающих приборов со стрелкой, указывающих и записывающих приборов с ленточной диаграммой и в виде указывающих и регистрирующих приборов с электропередатчиком для передачи показаний прибора на расстояние.

Для обеспечения хорошей работы прибора необходим точный и тщательный монтаж. Прибор должен быть установлен строго по отвесу на жестком щите, исключающем возможность сотрясений и вибраций прибора.

Вакуумметр — кольцевые весы. Для измерения высокого вакуума в пределах 80—100% вакуума чрезвычайно удобен вакуумметр типа кольцевых весов завода Тизприбор. Этот вакуумметр, помимо достоинств, общих с другими приборами типа кольцевых весов, имеет еще своим преимуществом то, что дает абсолютную величину давления, независимо от барометрического давления.

Вакуумметр (рис. 7) состоит из U-образной стеклянной трубки *1*, прикрепленной к стальному каркасу *2*. Каркас *2* опирается призмой на неподвижную подушку и может вращаться на некоторый угол. Один конец U-образной трубки соединяется толстостенной резиновой трубкой с пространством, в котором измеряется вакуум; другой конец трубки снабжен вакуумным краном *3*, через который прибор заполняется ртутью. Во время работы кран *3* должен быть тщательно закрыт.

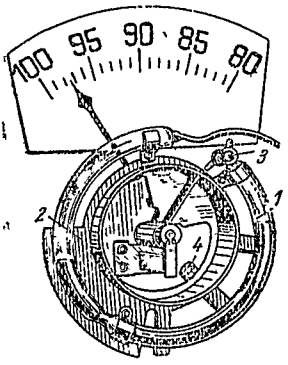


Рис. 7. Вакуумметр — кольцевые весы:
1 — U-образная трубка; *2* — каркас весов; *3* — кран; *4* — груз.

Работа вакуумметра аналогична работе кольцевых весов. Изменение вакуума перемещает часть ртути в левое колено, вследствие чего равновесие системы нарушается и подвижная часть прибора поворачивается против часовой стрелки до тех пор, пока изменяющийся момент груза *4* не приведет систему в новое положение равновесия.

Для обеспечения плавной работы прибора при резко изменяющихся значениях вакуума обе ветви U-образной трубки соединены трубкой малого сечения, трение ртути в которой производит успокаивающее (демпфирующее) действие.

Максимальное абсолютное давление, измеряемое прибором, около 150 *мм* рт. ст., поэтому прибор начинает работать с 80% вакуума.

Шкала прибора от 80 до 100% вакуума, отнесенного к 760 *мм* рт. ст.; деления шкалы через 1%.

Точность прибора ± 0,5%.

Прибор может быть снабжен электропередатчиком для передачи показаний на расстояние.

Поплавковые манометры. Неудобство чтения показаний U-образных стеклянных манометров и необходимость регистрации показаний потребовали создания приборов, отвечающих этим условиям.

Такими приборами являются поплавковые манометры, выполняющиеся в многих конструктивных вариантах.

Поплавковые манометры изготовляются двух основных типов: колонные для установки на полу и профильные для установки на щите.

Принцип устройства того и другого типа тот же, что и U-образного манометра, с тем лишь отличием, что в одном из колен помещен поплавок, следующий за изменяющимся уровнем жидкости. Поплавок связан с указывающей стрелкой, либо с пером, регистрирующим давление, либо с тем и другим одновременно.

Колонные поплавковые манометры изготовляются с водяным или масляным заполнением для измерения давлений в

пределах от 0 до 1500 *мм* вод. ст. и с ртутным заполнением с пределами измерений от 0 до 2,5 *кг/см²*. Точность первых 5—15 *мм* вод. ст.; вторых 4—20 *мм* рт. ст.

Недостатками колонных манометров являются громоздкость, невозможность установки на щите и отсутствие телепередачи.

Колонный поплавковый манометр изображен на рис. 8. Внутри цилиндрического сосуда *1* помещена труба *2*, соединяющаяся внизу отверстиями с пространством сосуда *1*. В трубе *2* находится цилиндрический поплавок *3*, перемещающийся при изменении уровня жидкости по направляющей штанге *4*. Для уменьшения трения поплавок опирается на штангу парой роликов *5*, прикрепленных к поплавку. Пространство над жидкостью в трубе *2* сообщается с атмосферой, а в сосуде *1* через штуцер *6* с измеряемым давлением.

Поплавок несет на себе тягу *7*, на верхнем конце которой укреплено перо, регистрирующее изменение давления на бумажной ленте, натянутой на барабан *8*, вращающийся часовым механизмом. Регистрирующая часть прибора закрыта колпаком *9* со стеклянным окошком для чтения диаграммы.

Прибор предназначается для измерения давления от 0 до 1500 *мм* вод. ст. Высота прибора около 1850 *мм*.

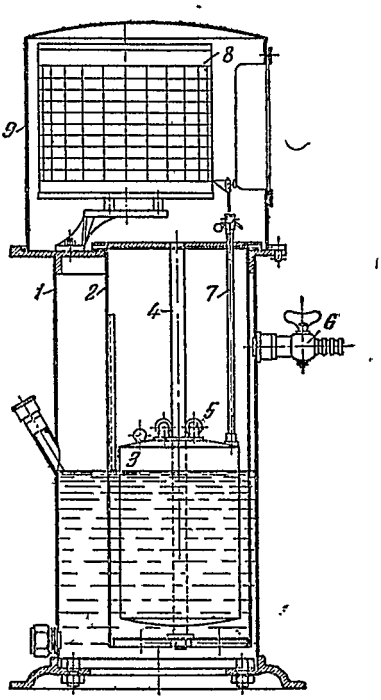


Рис. 8. Колонный поплавковый манометр:

1 — цилиндрический сосуд; *2* — внутренняя труба; *3* — поплавок; *4* — направляющая штанга; *5* — опорные ролики; *6* — штуцер для подачи давления; *7* — тяга поплавка; *8* — диаграммный барабан; *9* — колпак.

Профильные поплавковые манометры. Профильные манометры могут наполняться водой (для измерений в пределах от 0 до 100 *мм*) или ртутью (для измерений в пределах от 0 до 0,2 *кг/см²*).

Точность первых около 1 *мм* вод. ст., вторых 0,2—2,0%.

Профильные манометры приспособлены для щитового монтажа, весьма компактны и отличаются большой точностью, что делает их вполне пригодными для промышленного использования.

Профильный поплавковый манометр (рис. 9) состоит из алюминиевой рамы *1* и железного корпуса *2*, внутри которого помещены два призматических сосуда *3* и *4*, сообщающиеся в нижней части и образующие U-образный манометр. Сосуды *3* и *4* заполнены до определенного уровня какой-либо рабочей жидкостью (обычно маслом или водой). Измеряемое давление по трубке *5* подается в сосуд *3*, герметически закрытый сверху, вследствие чего уровень жидкости в нем понижается, а уровень жидкости в сосуде *4* повышается пропорционально отношению сечений сосудов *3* и *4*.

В сосуде *4* на поверхности жидкости помещен цилиндрический поплавок *6*, вращающийся вокруг эксцентрично расположенной оси *7*. К поплавку прикреплена указательная стрелка *8*, движущаяся по профильной шкале *9*. Повышение уровня жидкости в сосуде *4* вызывает поворот поплавка вокруг оси

на угол, пропорциональный величине подъема уровня. Соответственно стрелка передвигается по шкале, указывая величину давления в *мм* вод. ст.

Отсутствие каких-либо передаточных механизмов и направляющих повышает чувствительность прибора. Простота конструкции также весьма выгодно отличает этот прибор от аналогичных типов и обеспечивает надежность работы прибора в производственных условиях.

Прибор предназначается для измерения давлений 0—60 *мм* и 0—100 *мм* вод. ст. и может быть устроен с нулем посредине шкалы для измерения разрежения и давления в пределах от —30 до +30 и от —50 до +50 *мм* вод. ст. Точность прибора ± 2% предельного значения шкалы.

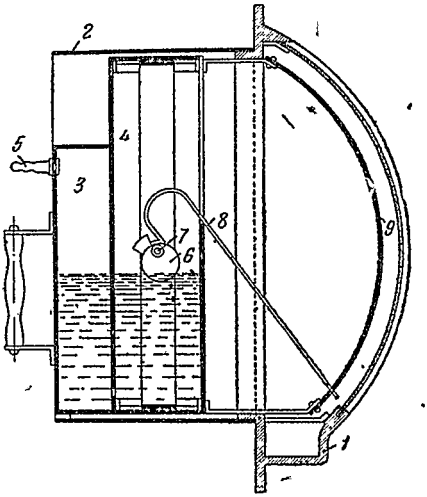


Рис. 9. Профильный поплавковый манометр:

1 — рама; *2* — корпус прибора; *3* и *4* — сообщающиеся сосуды; *5* — трубка для подачи давления; *6* — поплавок; *7* — ось вращения поплавка; *8* — указательная стрелка; *9* — профильная шкала.

Профильный манометр с ртутным заполнением (рис. 10) состоит из двух сообщающихся сосудов *1* и *2*, выточенных в стальном блоке *3*, заполненных ртутью. К сосуду *1* подводится измеряемое давление по трубе *4*.

В сосуде *2* на поверхности ртути плавает стальной поплавок *5*, подвешенный на ленте *6*, проходящей через отверстие в крышке сосуда. Лента *6* закреплена на шкивке *7*, жестко насаженном на ось *8*. Натяжение ленты обеспечивается контргрузом, висящем на ленте *9*, закрепленной на шкивке, насаженном на ось *8* рядом со шкивком *7*. К оси *8* укреплена алюминиевая стрелка *10*, двигающаяся по шкале *11*, градуированной в *мм* вод. ст. Манометр допускает работу на три предела измерений: 0—250, 0—500 и 0—750 *мм* вод. ст.

Переход от одного предела измерений к другому осуществляется сменой вставок в сосуде *1*. Сменные вставки навинчиваются на крышку сосуда *1*. Вставки изменяют объем и площадь сечения сосуда *1* и тем самым масштаб изменения уровня ртути в сосуде *2*. На рисунке изображена вставка, соответствующая пределу измерения 0—250 *мм*.

Для предупреждения выбрасывания ртути из манометра при резких толчках давления в сосуде *1* помещен предохранительный клапан *12*, состоящий из стального поплавка с резиновой прокладкой. При быстром изменении давления поплавок увлекается потоком ртути и, садясь на седло *13*, закрывает канал, сообщающий оба сосуда.

Прибор заключен в железный кожух *14*, приспособленный для монтажа на щите.

Колокольные манометры. Колокольные измерители давлений основаны на подъеме или погружении колокола, плавающего в жидкости, в зависимости от изменения давления в воздушном пространстве под колоколом.

Схема колокольного измерителя давления представлена на рис. 11. Манометр состоит из сосуда *1*, до половины заполненного жидкостью (вазелиновым маслом). В сосуде *1* помещен колокол *2*; внутренняя полость колокола соединяется трубкой *3* с пространством, давление в котором подлежит измерению. Колокол подвешен тягой *4* к рычагу *5*, опирающемуся в точке *O* на

неподвижную опору. На другом плече рычага *5* помещен уравновешивающий груз *6*. Рычаг *5* шарнирно соединен со стрелкой *7*, движущейся по градуированной шкале *8* и указывающей давление под колоколом.

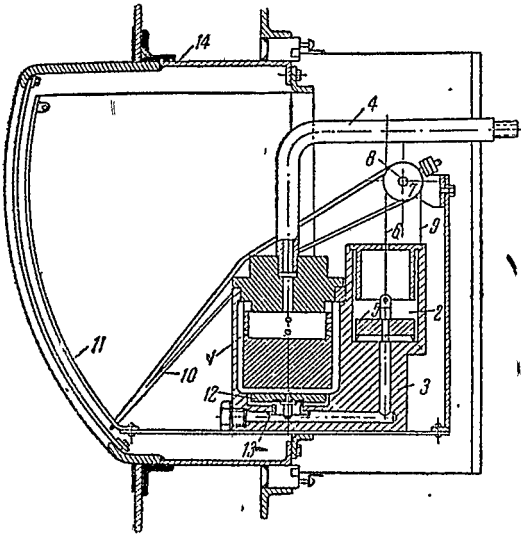


Рис. 10. Профильный манометр с ртутным заполнением:

1—2 — сообщающиеся сосуды; *3* — стальной блок; *4* — труба для подвода давления; *5* — поплавок; *6* — лента подвеса поплавка; *7* — шкивок; *8*—ось шкивка; *9* — лента подвеса контргруза; *10*—указательная стрелка; *11*—шкала; *12* — предохранительный клапан; *13* — седло клапана; *14*—кожух прибора.

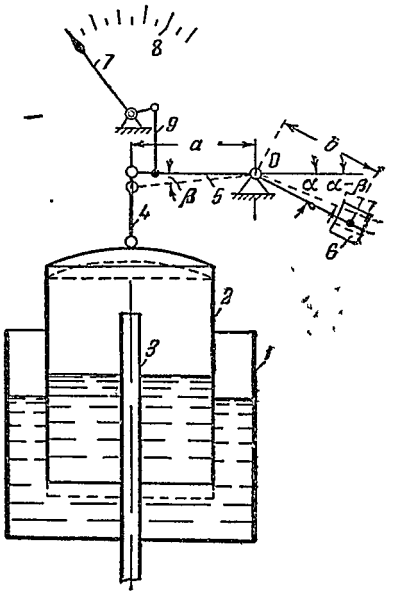


Рис. 11. Схема колокольного манометра:

1 — сосуд; *2* — колокол; *3* — трубка для подачи давления; *4* — тяга; *5* — рычаг; *6*—уравновешивающий груз; *7*—стрелка; *8* — шкала; *9* — соединительная тяга.

Условие равновесия колокола и груза можно найти из следующих соображений.

Момент вращения, создаваемый колоколом относительно точки опоры *O* рычага *5*, будет:

$$(g - pf)\, a \cos\beta = M_к \qquad (28)$$

Момент уравновешивающего груза:

$$qb\cos(\alpha + \beta) = M_e. \qquad (29)$$

В этих равенствах обозначены:

g — вес колокола;

p — давление под колоколом;

f — сечение колокола;

q — вес уравновешивающего груза;

a и b — длина плечей рычага;

α — угол наклона плеча b по отношению к плечу a.

Равновесие будет достигнуто при равенстве моментов, т. е. когда $M_к = M_е$ или

$$(g - pf)a\cos\beta = qb\cos(\alpha + \beta). \qquad (30)$$

Отсюда следует, что:

$$p = \left(\frac{g}{f} - \frac{qb}{fa}\cos\alpha\right) + \frac{qb}{fa}\sin\alpha\,\mathrm{tg}\,\beta. \qquad (31)$$

Принимая, что:

$$\frac{g}{f} - \frac{qb}{fa}\cos\alpha = A \quad \text{и} \quad \frac{qb}{fa}\sin\alpha = B,$$

где A и B — величины постоянные для каждого данного прибора, получим:

$$p = A + B\,\mathrm{tg}\,\beta. \qquad (32)$$

Это рассуждение и равенство (32) справедливы лишь в том случае, если стенки колокола настолько тонки, что весом вытесненной ими жидкости можно пренебречь.

Равенство (32) показывает, что величина измеряемого давления пропорциональна тангенсу угла поворота системы. Поэтому шкала прибора будет неравномерна.

Другой метод уравновешивания колокола заключается в приращении или убывании веса колокола при его подъеме или погружении в жидкость по закону Архимеда.

Тогда условием равновесия колокола, плавающего в жидкости, будет:

$$p\frac{\pi d^2}{4} = Q - \pi(d + \delta)\delta\gamma h, \qquad (33)$$

где p — давление под колоколом в *кг/см*^{2};
d — диаметр колокола в *см*;
Q — вес колокола в *кг*;
δ — толщина стенок колокола в *см*;
γ — плотность жидкости в *кг/см*^{3};
h — глубина погружения колокола в *см*.

При изменении давления под колоколом на величину Δp уравнение равновесия будет:

$$(p \pm \Delta p)\frac{\pi d^2}{4} = Q - \pi(d + \delta)\delta\gamma h_1, \qquad (34)$$

где $h_1 < h$, если Δp положительно, и $h_1 > h$, если Δp отрицательно.

Вычитая из уравнения (33) уравнение (34), получим:

$$\pm\Delta p\frac{\pi d^2}{4} = \pi(d + \delta)\delta\gamma(h - h_1). \qquad (35)$$

Обозначая разность $h - h_1$ через Δh, получим:

$$\pm\Delta p\frac{d^2}{4} = (d + \delta)\delta\gamma\Delta h. \qquad (36)$$

Отсюда следует, что:

$$\Delta h = \frac{\Delta p d^2}{4(d + \delta)\delta\gamma}. \qquad (37)$$

Последнее уравнение позволяет определить величину всплывания или погружения колокола при изменении давления. Из этого же уравнения видно, что значение перемещения колокола при изменении давления зависит не от его веса, а лишь от его геометрических размеров.

Колокольные манометры применяются для измерения небольших давлений. Манометры с водяным или масляным заполнением для давления от 0 до $\pm$ 75 *мм* вод. ст., с ртутным заполнением от 0 до $\pm$ 400 *мм* вод. ст.

Приборы устраиваются с приспособлениями для регистрации давлений и телепередатчиками.

Колокольный манометр Горн (сист. З. З. Левинсона). Прибор предназначен для измерения разрежений и очень небольших положительных давлений. Манометр состоит (рис. 12) из сосуда *1*, наполненного рабочей жидкостью (вазелиновым маслом), в котором плавает колокол *2*, подвешенный шарнирно к рычагу *3*. На другом плече рычага *3* укреплены два уравновешивающих груза *4* и *5*.

Через трубку *6* пространство под колоколом соединяется с пространством, в котором измеряется разрежение.

Увеличение разрежения вызовет погружение колокола, поворот против часовой стрелки рычага *3* вместе со стрелкой *7*, движущейся по шкале *8*. Рычаг вращается на кернах, опирающихся в заточки центровых винтов, укрепленных в стойке. Стрелка *7* несет на себе перо *9*, чертящее диаграмму изменения давления на диаграммной ленте *10*. Лента *10* перекинута через барабан *11*, внутри которого находится часовой механизм, и натягивается пружинным валиком *12*.

Нажим пера на бумагу регулируется винтом, приближающим стойку стрелки к оси или удаляющим от нее.

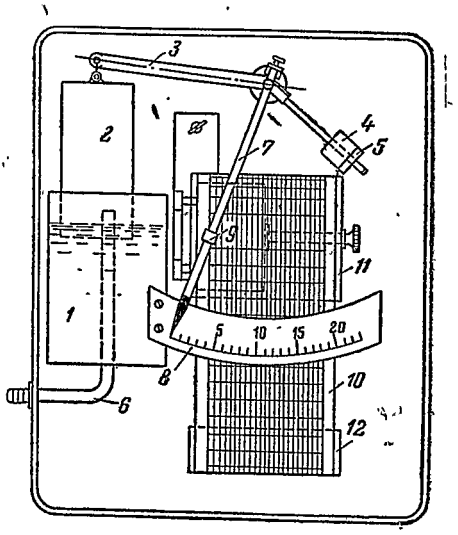


Рис. 12. Колокольный манометр «Горн»:
1 — сосуд; *2* — колокол; *3* — рычаг; *4* и *5* — уравновешивающие грузы; *6* — трубка для подачи давления; *7* — указательная стрелка; *8* — шкала; *9* — перо; *10* — диаграммная лента; *11* — барабан ленты; *12* — натяжной валик.

Прибор устраивается со шкалами: 2—0—8; 0—10; 0—30; 0—50 *мм* вод. ст.

Чувствительность прибора 0,1—0,2 *мм* вод. ст., точность $\pm$ 2% от максимального значения шкалы.

Колонный колокольный манометр Гидро конструктивно состоит из цилиндрического сосуда, заполненного до определенного уровня жидкостью.

В рабочей жидкости, налитой в сосуд, плавает колокол, внутреннее пространство которого сообщается при помощи труб с измеряемым давлением. Пространство над колоколом соединено с атмосферой.

Внутри колокола коаксиально укреплен цилиндрический поплавок, создающий при выходе из жидкости противодействующую силу, уравновешивающую давление.

К колоколу прикреплена вертикальная тяга, несущая на верхнем конце перо, регистрирующее изменение давления на бумажной ленте, натянутой на барабан со встроенным часовым механизмом. В некоторых моделях с тягой связан передаточный механизм, передающий движение колокола указывающей стрелке, перемещающейся по концентрической шкале, градуированной в единицах давления. Колокол направляется штангой, опираясь на нее парой роликов.

Прибор рассчитан на давление до 50 *мм* вод. ст.

7. Жидкостные дифференциальные манометры

В производственной практике приходится весьма часто встречаться с необходимостью измерения разности давлений. Определение сопротивления промывных, абсорбционных или реакционных колонн и башен, определение расхода жидкостей, паров и газов требуют измерения разности давлений между двумя точками. В общем случае разность давлений может быть найдена подсчетом из результатов независимых измерений обоих давлений. Однако применение двух приборов и мало удобно и, что наиболее существенно, не обеспечивает достаточной точности измерения. Особенно недостоверным становится измерение разности давлений двумя отдельными манометрами, когда разность давлений мала, а само давление велико.

Поэтому для измерения разности давлений применяются специальные приборы, называемые дифференциальными манометрами.

Жидкостные манометры U-образные, чашечные, с наклонной трубкой и другие — все по существу являются дифференциальными и могут быть использованы без каких-либо изменений. Для использования манометров этих типов в качестве дифференциальных достаточно присоединить обе ветви манометра к одной и другой точке.

Однако применение обычных U-образных или чашечных манометров не всегда возможно, так как при небольшой разности давлений подводимое давление может быть велико и обычный U-образный или чашечный манометр будет недостаточно прочен.

Кроме того, почти всегда кроме разности давлений необходимо знать величину давления, чего не может дать обычный тип жидкостного манометра. Поэтому для измерения разности давлений применяют специальные конструкции жидкостных манометров.

U-образный дифференциальный манометр. Изображенный на рис. 13 U-образный дифференциальный манометр состоит из двух толстостенных стеклянных трубок *1* и *2*, соединенных двумя металлическими головками: нижней *3* и верхней *4*. Нижняя головка *3* из призматического стального бруска снабжена горизонтальным каналом и двумя вертикальными каналами с сальниками, в

которых закрепляются стеклянные трубки. Верхняя головка *4* имеет горизонтальный канал, два вертикальных канала с сальниками для закрепления стеклянных трубок, вертикальный канал для установки пружинного манометра, два ниппеля *5* для присоединения манометра к точкам отбора давлений и три вентиля *6*, *7* и *8*.

Вентили *6* и *7* перекрывают вертикальные каналы, подводящие давление к трубкам манометра, а вентиль *8* перекрывает горизонтальный канал, отделяя правую ветвь манометра от левой.

Между трубками помещена шкала *9*, которая может передвигаться по вертикали для установки нулевого штриха против мениска жидкости. На верхней головке имеется, кроме того, продувной краник для выпуска воздуха при наполнении манометра жидкостью.

Все детали манометра укреплены на доске *10*.

Назначение вентилей на верхней головке — включение манометра в работу без толчков, могущих выбросить жидкость из манометра.

Манометр присоединяют к давлению следующим порядком. Вентили *6* и *7* закрывают, а вентиль *8* открывают. Затем открывают запорные вентили на трубопроводах, подводящих давление к манометру. После полного открытия обоих вентилей на трубопроводах медленно открывают одновременно вентили *6* и *7* и после их открытия также медленно и осторожно закрывают вентиль *8*. Закрытием вентиля *8* заканчивается включение манометра в работу. Выключение манометра производится в обратном порядке: открывают вентиль *8*, закрывают вентили *6* и *7* и закрывают запорные вентили на трубопроводах.

Разность давлений отсчитывается по шкале, как сумма двух отсчетов по правой и левой трубке, а рабочее давление по пружинному манометру на верхней головке.

Измерения разности давлений жидкости или пара производятся при заполнении манометра над ртутью данной жидкостью или конденсатом пара. Величина разности давления при этом будет:

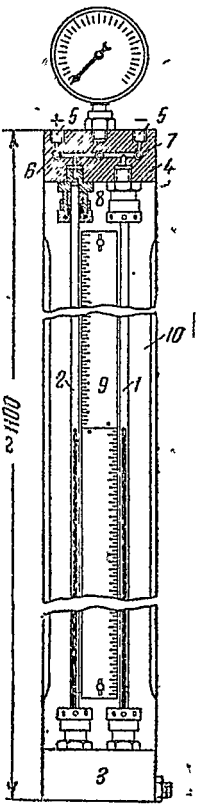


Рис. 13. U-образный дифференциальный манометр: *1* и *2* — стеклянные трубки; *3* и *4* — головки; *5* — ниппели для присоединения; *6*, *7* и *8* — вентили; *9* — шкала; *10* — доска манометра.

$$p = h(\gamma - \gamma_1), \qquad (38)$$

где p — разность давлений в *кг/см²*;

h — сумма отсчетов по правой и левой трубке в *см*;

γ — плотность ртути в *кг/см³*;

γ_1 — плотность жидкости над ртутью в *кг/см³*.

В случае заполнения манометра над ртутью водой разность давлений будет:

$$p = 0{,}0126\,h \ кг/см^2.$$

Диференциальные U-образные и чашечные манометры строятся со шкалой не выше 1000 *мм* рт. ст., т. е. на максимальную разность давлений порядка 1,4 *кг/см*^{2} на рабочее давление до 60 *кг/см*^{2}.

Точность манометров обычно около 1 *мм* рт. ст.

Чашечный диференциальный манометр. Чашечный манометр отличается от U-образного тем, что одна из трубок сделана стальной, а нижняя головка имеет внутри полость (чашку) для ртути. Шкала расположена у стеклянной трубки и имеет нулевой штрих внизу.

При измерении U-образным и чашечным диференциальным манометром следует учитывать поправки, указанные в описании соответствующих манометров (стр. 21).

Колокольные диференциальные манометры (тягомеры). Колокольные тягомеры по принципу устройства и работы аналогичны колокольным манометрам, описанным в 6 параграфе, отличаясь от них наличием двух колоколов.

На рис. 14 показано устройство двухколокольного диференциального манометра.

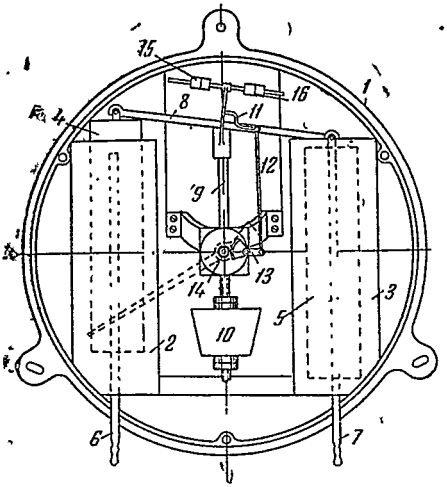


Рис. 14. Двухколокольный диференциальный манометр:

1 — корпус манометра; *2* и *3* — сосуды; *4* и *5* — колокола; *6* и *7* — трубки для подачи давления; *8* — равноплечее коромысло; *9* — стержень; *10* — груз; *11* — рычажок передачи; *12* — поводок; *13* — зубчатый сектор; *14* — шестеренка; *15* и *16* — регулирующие грузы.

В круглом корпусе *1* помещены два цилиндрических сообщающихся сосуда *2* и *3*, в которых плавают колокола *4* и *5*. Через дно сосудов под колокола введены трубки *6* и *7*, которыми воздушное пространство колоколов сообщается с точками отбора давления. Колокола подвешены к равноплечему коромыслу *8*, опирающемуся посредине призмой на подушку. К коромыслу прикреплен вертикальный стержень *9*, несущий на нижнем конце груз *10*. При отвесном положении стержня *9* коромысло отклонено от горизонтали на некоторый угол.

С коромыслом жестко связан рычажок *11*, расположенный параллельно коромыслу. Рычажок *11* шарнирно скреплен с поводком *12*, другой конец которого также шарнирно связан с хвостом зубчатого сектора *13*. Сектор *13* при повороте вращает сцепляю-

нуюся с ним шестеренку *14*, на ось которой насажена указательная стрелка, движущаяся по концентрической шкале.

Для градуировки прибора коромысло снабжено регулирующими грузиками *15* и *16*.

Сосуды *2* и *3* заполняются вазелиновым маслом и прибор устанавливается так, чтобы указательная стрелка стояла на нуле шкалы. Обе трубки *6* и *7* соединяют с точками отбора давлений так, чтобы более высокое давление было присоединено к трубке *7*. Колокол *5* начнет подниматься, а колокол *4* опускаться до тех пор, пока увеличивающийся при отклонении стержня *9* момент груза *10* не уравновесит момент действующих сил давления под колоколами. Указательная стрелка при этом также повернется на некоторый угол, указав на шкале разность давлений в *мм* вод. ст.

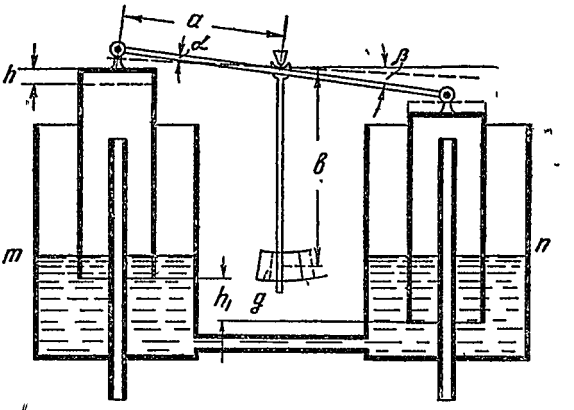


Рис. 15. Схема уравновешивания двухколокольного диференциального манометра.

Прибор градуируется по образцовому манометру в *мм* вод. ст.

Условия равновесия прибора определяются из следующих соображений. Из схемы на рис. 15 видно, что при отсутствии давления под колоколами масло в обоих сосудах стоит на одном уровне mn, коромысло наклонено к горизонту под углом β, а стержень b с грузом g расположен вертикально по отвесу. Левый колокол стоит выше правого на высоту h_1.

Допустим, что под правым колоколом будет давление p_1, а под левым p_2, причем $p_1 > p_2$.

Если наружные площади колоколов равны, то действия атмосферного давления на оба колокола взаимно уничтожаются.

Под действием внутренних давлений колокола переместятся, причем правый колокол поднимется, а левый опустится на высоту h, а коромысло и жестко связанный с ним стержень повернутся вокруг точки опоры на некоторый угол α.

Вращающий момент обоих колоколов относительно оси вращения будет равен разности моментов правого и левого колокола, т. е.:

$$M_{\text{к}}^{\text{вр}} = (p_1 f_0 - h f_1 \gamma)\, a \cos(\beta - \alpha) - (p_2 f_0 + h f_1 \gamma)\, a \cos(\beta - \alpha) = [(p_1 - p_2) f_0 - 2 h f_1 \gamma]\, a \cos(\beta - \alpha), \quad (39)$$

где a — длина плеча коромысла;
f_0 — площадь сечения колокола;
f_1 — площадь сечения стенок колокола;
γ — плотность жидкости.

Противодействующий вращающий момент груза будет:

$$M_{\text{г}}^{\text{пр}} = gb \sin \alpha, \quad (40)$$

где b — длина плеча стержня от точки вращения до центра тяжести системы, стержень — груз;
g — вес груза, укрепленного на стержне.

Равновесие наступит при равенстве моментов:

$$M_к = M_г$$

или

$$[(p_1 - p_2)f_0 - 2hf_1\gamma]\, a \cos(\beta - \alpha) = gb \sin \alpha. \quad (41)$$

Обозначая разность давлений p_1—p_2 через Δp, получим:

$$(\Delta p f_0 - 2hf_1\gamma)\, a \cos(\beta - \alpha) = gb \sin \alpha. \quad (42)$$

При очень тонких стенках колоколов величиной $2hf_1\gamma$ можно пренебречь, тогда уравнение (42) примет вид:

$$\Delta p f_0 a \cos(\beta - \alpha) = gb \sin \alpha. \quad (43)$$

Отсюда

$$\Delta p = \frac{gb}{f_0 a} \cdot \frac{\sin \alpha}{\cos(\beta - \alpha)}. \quad (44)$$

Множитель $\frac{gb}{f_0 a}$ для каждого прибора будет постоянным и может быть обозначен через K — постоянную прибора.

Тогда

$$\Delta p = K \frac{\sin \alpha}{\cos(\beta - \alpha)}. \quad (45)$$

Таким образом, зависимость между величиной разности давлений и величиной перемещения колоколов выражается синусоидальной функцией и шкала прибора получается неравномерной. При небольших углах поворота коромысла эта неравномерность невелика и не требует приспособлений для ее выравнивания.

Расчеты показывают, что при небольших размерах колоколов движущие силы прибора невелики, что требует максимального уменьшения трения в деталях механизма прибора. При тщательном изготовлении и сборке деталей прибор отличается постоянством показаний и достаточной чувствительностью.

Сильное влияние на чувствительность прибора оказывает вязкость масла. Поэтому следует заполнять прибор маловязкими сортами масла — вазелиновым, веретенным.

Прочие виды жидкостных диференциальных манометров. Кольцевые весы, описанные в 6-м разделе, могут работать и применяются в качестве диференциального манометра. Для этого обе полости кольца — правую и левую — сообщают с точками отбора давления. Отклонение весов будет пропорционально разности давлений в обеих точках.

В качестве диференциальных манометров применяются и поплавковые манометры; при этом также давления присоединяются к обеим ветвям прибора.

Однако кольцевые и поплавковые диференциальные манометры в подавляющем большинстве случаев используются для измерения потоков жидкостей, газов и паров в так называемых дроссельных расходомерах. Поэтому описание этих приборов дается в главе, посвященной приборам для измерения расходов (стр. 126).

8. Поршневые манометры

Общие сведения. Приборы для измерения давлений, носящие название поршневых манометров, имеют пока ограниченную область применения. Поршневые манометры основаны на уравновешивании силы, создаваемой измеряемым давлением на поршень, движущийся в цилиндре, другой внешней силой, создаваемой грузом или упругостью пружины. О величине измеряемого давления судят по величине груза или деформации пружины.

Поршневые манометры позволяют измерять весьма большие давления с точностью, приближающейся к точности жидкостных манометров. Высокая чувствительность и точность поршневых манометров делает их весьма ценными в качестве командных приборов в схемах автоматического управления и регулировки.

Особенностью поршневых манометров является ограниченность диапазона измерения давления. Поршневые манометры имеют шкалу в пределах 2—5 *кг/см²*, но нуль шкалы может соответствовать любому давлению, устанавливаемому при настройке прибора. Таким образом они наиболее пригодны для измерения высоких давлений, колеблющихся в узких пределах (± 5 *кг/см²*).

Такие условия чаще всего имеют место в теплоэнергетических установках, а в химической промышленности — в аппаратах синтеза при высоких давлениях.

Кроме прямого измерения давлений поршневые манометры широко применяются для поверки и градуировки пружинных манометров (прибор Рухгольца).

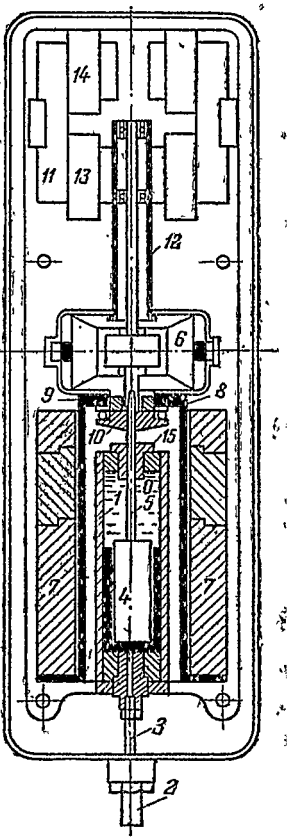


Рис. 16. Поршневой манометр ВТИ:
1 — цилиндр; *2* — ниппель; *3* — трубка для подвода давления; *4* — плунжер; *5* — шток; *6* — асинхронный мотор; *7* — грузы; *8* — трубчатая подвеска грузов; *9* — шайба подвески; *10* — опорный подшипник; *11* — трансформаторный передатчик; *12* — сердечник трансформатора; *13* и *14* — вторичные обмотки трансформатора; *15* — сальник штока.

Поршневой манометр ВТИ. Манометр (рис. 16) состоит из цилиндра *1*, нижняя часть которого наполнена ртутью, а верхняя маслом. Через ниппель *2* и трубку *3* цилиндр сообщается с измеряемым давлением. В ртуть погружен стальной плунжер *4*, соединенный со штоком *5*.

Шток *5* выходит из цилиндра *1* через сальник *15*. При увеличении давления шток с плунжером поднимается на некоторую высоту, пропорциональную изменению давления. Сила, поднимающая шток, равна давлению, умноженному на площадь поперечного сечения штока. Уравновешивающая

сила создается увеличением веса системы вследствие выдвижения плунжера из ртути. Таким образом, каждому значению давления будет однозначно соответствовать определенное положение по высоте штока с плунжером.

Высота подъема штока определится из равенства:

$$h = \frac{\Delta p}{\gamma_1 - \gamma} \cdot \frac{F - f}{F} \cdot \frac{f_1}{f} \text{ см}, \qquad (46)$$

где h — подъем штока в *см*, соответствующий изменению давления Δp;
Δp — прирост давления в *кг/см²*;
γ — плотность масла в *кг/см³*;
γ_1 — плотность ртути в *кг/см³*.
F — площадь сечения цилиндра в *см²*;
f — площадь сечения плунжера в *см²*;
f_1 — площадь сечения штока в *см²*.

Для уменьшения трения и повышения чувствительности прибора шток *5* все время вращается со скоростью 170 об/мин. асинхронным мотором *6*, ось ротора которого через редуктор соединена со штоком.

Интервал измерений манометра устанавливается загрузкой штока грузами *7*, надевающимися на трубчатую подвеску *8*, укрепленную к шайбе *9*. Шайба *9* через шариковый опорный подшипник *10* подвешена к заплечикам оси ротора мотора и таким образом нагрузка передается на шток *5*, причем нагрузка не участвует во вращении штока манометра.

В верхней части прибора размещен электрический передатчик показаний прибора на расстояние. Передатчик состоит из трехстержневого трансформатора *11*, в воздушном промежутке которого движется сердечник *12*, связанный со штоком манометра, а следовательно, перемещающийся вертикально тождественно с ним. Сердечник связан со штоком также шариковыми подшипниками и не вращается.

Изменение положения сердечника в воздушном промежутке трансформатора изменяет отношение индуктированных токов во вторичных обмотках *13* и *14*. Вторичный прибор представляет собой логометр переменного тока типа Гейгера с серпообразным сердечником.

Электрическая схема соединения манометра представлена на рис. 17. Диапазон измерения прибора 5 *кг/см²*. Начальное давление, устанавливаемое величиной грузов *7*, от 10 до 100 *кг/см²*. Точность прибора около $\pm 0{,}02$ *кг/см²*.

Прибор Рухгольца. Прибор Рухгольца является лабораторным поршневым манометром, служащим для поверки манометров других типов, главным образом пружинных.

Прибор (рис. 18) состоит из колонки *1*, укрепленной на станине прибора *2*. Колонка имеет по оси вертикальный цилиндрический канал, в котором движется пришлифованный поршень *3*, несущий на верхнем конце тарелку *4* для накладывания грузов.

В станине *2* высверлен горизонтальный канал *5*, в расширенной части которого *6* движется от винтового штока *7* манжетный поршень *8*. Канал *5* соединяется с каналом колонки *1* и с вертикальными каналами *9* и *10*, служащими для присоединения к прибору поверяемых или контрольных манометров.

Каналы колонки и штуцеров *9* и *10* снабжены вентилями *11*, *12* и *13* для отсоединения их от канала *5*. Вентиль *15* служит для выпуска масла из прибора.

Работа прибора протекает следующим порядком. Прибор устанавливается строго по уровню, так чтобы канал колонки распо-

ложился точно по отвесу. Поршень *3* вынимают из колонки и заполняют каналы жидкостью (глицерином, маслом) так, чтобы она частично заполнила воронку *14*. Затем вставляют поршень *3* в колонку примерно на половину его длины, регулируя глубину погружения поршня *3* передвижением поршня *8*.

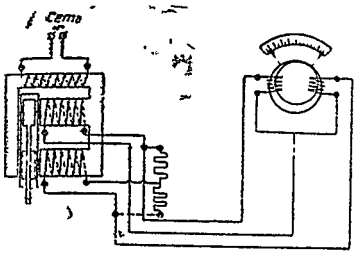


Рис. 17. Электрическая схема манометра ВТИ.

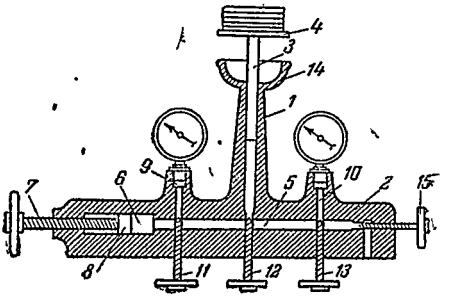


Рис. 18. Прибор Рухгольца:

1 — колонка прибора; *2* — станина; *3* — поршень; *4* — тарелка для грузов; *5* — горизонтальный канал; *6* — цилиндр пресса; *7* — винтовой шток; *8* — поршень; *9* и *10* — вертикальные каналы; *11*, *12* и *13* — вентили; *14* — воронка; *15* — спускной вентиль.

К штуцеру *9* или *10* присоединяют испытуемый манометр и, открыв вентили *12* и *11* или *13*, нагружают поршень грузами. Для уменьшения влияния трения поршень *3* приводят во вращение от руки.

Вес самого поршня и наложенного на него груза создает давление в жидкости, наполняющей каналы. Величина этого давления будет равна:

$$p = \frac{Q_{\text{п}} + Q_{\text{гр}}}{S_{\text{п}}}, \qquad (47)$$

где p — давление в *кг/см*^{2};

$Q_{\text{п}}$ — вес поршня с тарелкой в *кг*;

$Q_{\text{гр}}$ — вес наложенного на тарелку груза в *кг*;

$S_{\text{п}}$ — площадь поршня в *см*^{2}.

Из этого равенства вытекает, что развиваемое давление в жидкости будет тем больше, чем больше вес грузов и чем меньше площадь поршня.

Зная вес системы и площадь поршня, мы будем знать и величину давления в приборе. Таким образом, этот прибор одновременно и создает давление и его измеряет.

Уплотнение поршня в канале колонки достигается тщательной пришлифовкой его с доведением зазора между поршнем и поверхностью канала до минимально возможной величины; обычно величина зазора выражается в 0,005—0,003 *мм*. При такой величине зазора утечка жидкости и опускание поршня весьма малы. Утечку жидкости во время работы компенсируют передвижением поршня *8*, поддерживая глубину погружения поршня *3* на одном уровне.

Площадь поршня в приборе Рухгольца обычно выполняется в 1 $см^2$, а вес поршня и гирь подгоняется таким образом, чтобы он создавал давление в целых числах $кг/см^2$. Гири изготавливаются такого веса, чтобы можно было получать давления через 1—5 и 10 $кг/см^2$. Максимальное давление в приборе Рухгольца 50 $кг/см^2$. Точность прибора Рухгольца достигает 0,05—0,1% от измеряемой величины.

На принципе прибора Рухгольца строятся другие поршневые приборы для создания и измерения высоких и сверхвысоких давлений порядка 2000 и 5000 $кг/см^2$.

9. Пружинные трубчатые манометры

Общие сведения. Жидкостные и поршневые манометры, отличаясь высокой точностью, мало удобны для широкого промышленного применения. Жидкостные манометры имеют очень ограниченный предел измерения, а поршневые отличаются сложностью конструкции и высокой стоимостью.

Производственные измерительные приборы, в частности манометры, должны обладать следующими качествами: простотой конструкции и обслуживания, наглядностью показаний, непосредственно выраженных в единицах измерения, малыми габаритами и достаточной для производственных измерений точностью. Для большинства случаев производство удовлетворяет точность в 1—2% измеряемой величины.

Указанными качествами обладают так называемые пружинные манометры, завоевавшие себе широкое применение во всех областях техники.

В этих приборах давление измеряется величиной упругой деформации различного рода упругих деталей. Деформация через специальный передаточный механизм передается указателю, двигающемуся по шкале, градуированной в единицах давления.

По виду деформируемой детали пружинные манометры делятся на трубчатые и мембранные.

Трубчатые манометры подразделяются на манометры с трубкой Бурдона, с геликоидальной трубкой и со спиральной трубкой.

Трубка Бурдона. Измерительной деталью манометра Бурдона является изображенная на рис. 19 согнутая по дуге круга трубка эллиптического или овального сечения *1*. Один конец трубки вделан в держатель *2*, снабженный внутренним каналом и ниппелем для присоединения к трубопроводу; другой конец трубки наглухо закрыт пробкой *3*. Держатель с трубкой укреплен в цилиндрическом корпусе *4* и имеет в верхней части площадку для закрепления на ней передаточного механизма.

Свободный, закрытый пробкой *3* конец трубки шарнирно соединен тягой *5* с зубчатым сектором *6*. Сектор вращается вокруг оси *7* и сцеплен с шестеренкой *8*, на оси которой укреплена стрелка *9*.

Для уничтожения зазоров в шарнирах и зубчатой передаче ось шестерни связана с тонкой спиральной пружинкой (волоском),

которая своей упругостью поддерживает плотное соприкосновение шестеренки с сектором.

Если присоединить манометр к пространству, давление в котором выше атмосферного, то давление заставит трубку *1* несколько разогнуться. Конец трубки *3* переместится вправо и тягой *5* повернет зубчатый сектор вокруг оси *7* на некоторый угол. Одновременно повернется и шестеренка *8* со стрелкой *9*, указав на шкале величину давления.

Экспериментальное исследование трубок Бурдона показало, что для каждой трубки до известной величины давления наблюдается прямолинейная зависимость между давлением и деформацией. При дальнейшем повышении давления эта прямолинейная зависимость исчезает и величина деформации возрастает быстрее повышения давления. На рис. 20 представлена диаграмма перемещения свободного конца трубки в зависимости от давления. Из диаграммы видно, что для исследованной трубки до давления 16 *кг/см²* перемещение свободного конца строго пропорционально повышению давления; эта пропорциональность резко нарушается для давлений выше 16 *кг/см²*.

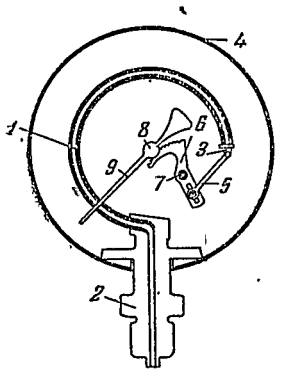


Рис. 19. Схема манометра Бурдона:

1 — пружинная трубка манометра; *2* — держатель трубки; *3* — пробка; *4* — корпус манометра; *5* — тяга; *6* — зубчатый сектор; *7* — ось сектора; *8* — шестеренка стрелки; *9* — стрелка.

Точка, соответствующая предельному давлению, при котором еще сохраняется прямолинейная зависимость, называется пределом пропорциональности трубки и является ее важной характеристикой. При переходе предела пропорциональности трубка приобретает остаточную деформацию и становится не пригодной для измерения. Поэтому трубка Бурдона может быть использована в качестве измерителя давлений только в области, лежащей ниже предела пропорциональности. Максимальное рабочее давление следует назначать ниже предела пропорциональности, вводя некоторый запас прочности.

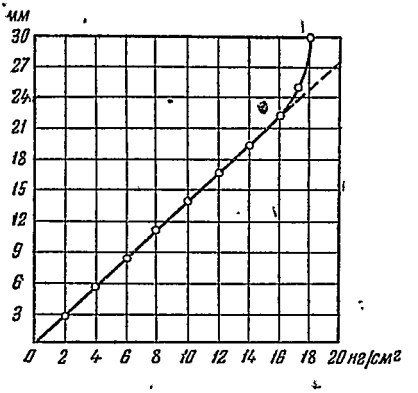


Рис. 20. Диаграмма перемещений свободного конца трубки Бурдона.

Если обозначить $p_к$ — давление, соответствующее пределу пропорциональности, а $p_р$ — максимальное рабочее давление, то

$$\frac{p_к}{p_р} = K, \qquad (48)$$

где K — коэфициент прочности трубки, во всех случаях больший единицы.

Для достижения наибольшей долговечности трубки и уменьшения влияния упругого последействия коэфициент прочности следует принимать равным двум ($K=2$).

Обычно работа трубчатых манометров допускается в случае спокойной нагрузки в пределах средней трети шкалы; для резко колеблющейся нагрузки в пределах средней трети шкалы, но без перехода за пределы половины шкалы.

Механическая характеристика трубки, т. е. значение предела пропорциональности, величина перемещения свободного конца и чувствительность трубки зависят от ряда факторов, из которых наиболее важными являются отношение осей элипса сечения трубки, толщина стенки трубки и радиус изгиба трубки.

Повышение отношения осей трубки при прочих равных условиях повышает чувствительность и понижает предел пропорциональности.

Для обычных манометров отношение осей принимают от 2 до 3, для манометров низких давлений, вакуумметров и манометрических термометров берут большие отношения осей — от 5 до 10.

Повышение толщины стенок трубки резко повышает предел пропорциональности, особенно при толщине стенок выше 0,6 *мм*. Это обстоятельство позволяет выполнять манометры на большие давления — до 2000 *кг/см*^{2}.

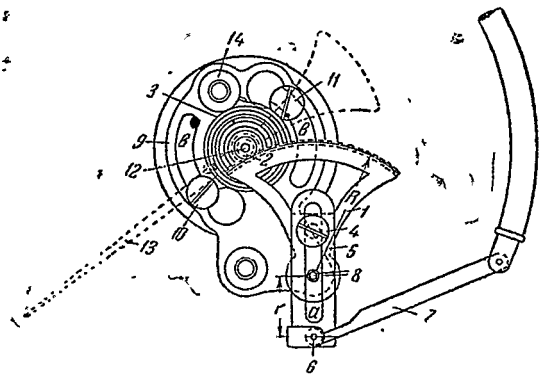


Рис. 21. Зубчато-секторный механизм манометра Бурдона:

1 — сектор; *2* — шестеренка; *3* — спиральный волосок (пружинка); *4* — соединительный винт; *5* — регулирующая пластинка; *6* — шарнир поводка, *7* — поводок; *8* — ось сектора; *9* — основная плита; *10* и *11* — крепежные винты; *12* — ось стрелки; *13* — указательная стрелка; *14* — колонка.

Передаточные механизмы манометров Бурдона. Перемещение свободного конца трубки под действием давления незначительно. Поэтому для увеличения чувствительности и наглядности показаний прибора приходится вводить передаточный механизм к стрелке, увеличивающий масштаб отклонений конца трубки.

Передаточные механизмы выполняются двух видов: зубчато-секторный и рычажный.

Зубчато-секторный передаточный механизм (рис. 21) состоит из сектора *1*, шестеренки *2*, сцепляющейся с сектором, и спиральной пружинки (волоска) *3*. Ось шестеренки *2* несет указательную стрелку манометра *13*. Волосок *3* одним концом закреплен к оси шестеренки, а другим концом к колонке *14*. Натяжение волоска уничтожает холостой ход стрелки из-за зазоров в зубчатом зацеплении и шарнирных механиз-

мов. К сектору винтом *4* укреплена пластинка *5*, имеющая продольный прорез *а*, несущая шарнир *6* поводка *7*, соединяющего сектор со свободным концом трубки Бурдона.

Прорез *а* позволяет закреплять пластинку *5* в том или ином положении, отдаляя или приближая шарнир *6* к оси *8* сектора, изменяя, таким образом, отношение плеч сектора. Такое устройство делается для подгонки индивидуальных характеристик отдельных трубок и сохранения одной длины шкалы манометра (обычно 270°).

При повороте сектора вокруг оси *8* на некоторый угол α длина дуги, пройденной любой точкой зубчатого венца сектора, будет $L=R\alpha$; в то же время длина дуги, пройденной шарниром *6* поводка, будет $l = r\alpha$. Отсюда следует:

$$L = R\frac{l}{r}. \qquad (49)$$

Так как при постоянном угле шкалы манометра L и R остаются постоянными, а l зависит от величины перемещения свободного конца трубки, различной для различных трубок, необходимо для удовлетворения равенства (49) иметь возможность менять r. Это достигается наличием прореза и перемещением пластинки *5* в ту или другую сторону. Необходимость в регулировании положения шарнира *6* возникает не только в производстве манометров, но и при их ремонте.

Весь механизм укреплен на плите *9*, которая винтами *10* и *11* крепится к держателю трубки манометра. Плита *9* также снабжена прорезами *b* для винтов *10* и *11*, что дает возможность дополнительной регулировки системы поворотом всего механизма на некоторый угол вокруг оси стрелки.

Менее чувствительные приборы и приборы, предназначенные для установок, подверженных толчкам и сотрясениям, снабжаются рычажным передаточным механизмом.

Рычажный передаточный механизм (рис. 22) состоит из оси *1*, несущей стрелку манометра, и рычажка *2*, жестко закрепленного на оси *1*. С рычажком *2* шарнирно соединен поводок *3*, другой конец которого присоединен шарниром *4* к свободному концу трубки манометра. При перемещении конца трубки поводок тянет рычажок *2*, поворачивающий ось со стрелкой.

Регулировка в этом механизме осуществляется подгибанием рычажка *2*, изменяющим плечо действия силы на ось.

Рычажный механизм обычно дает шкалу с углом 90°, расположенную эксцентрично, и применяется, главным образом, в специальных манометрах малого размера.

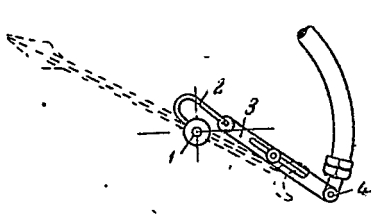


Рис. 22. Рычажный механизм манометра Бурдона:

1 — ось стрелки; *2* — рычажок оси; *3* — поводок; *4* — шарнир поводка.

Рабочие манометры Бурдона. Манометры с трубкой Бурдона по степени своей точности и области применения делятся на рабочие, контрольные и образцовые.

Рабочие манометры в свою очередь, в зависимости от устройства, разделяются на указывающие, регистрирующие, манометры с телепередачей и контактные манометры.

Рабочие манометры являются нормальными эксплоатационными приборами.

Указывающие манометры — наиболее дешевые и простые приборы, применимы везде, где не требуется записи по-

казаний или передачи показаний на расстояние. Наиболее подходящими для производственных условий будут манометры диаметром 150, 200 и 300 *мм*, так как манометры указанных размеров имеют достаточно четкую, легко читаемую шкалу.

Регистрирующие манометры выполняются с дисковой и ленточной диаграммой. Приборы с дисковой диаграммой обычно не имеют указывающей стрелки и шкалы. Изготовляются на предельные давления 3, 5, 8, 10, 12, 16, 20, 30, 40 и 50 *кг/см*^{2}. Диаметр диаграммного диска 160 *мм*; диск приводится в движение часовым механизмом, делая один оборот в 24 часа.

Передаточный механизм манометра рычажный; угол поворота пера $\sim$ 40°.

Приборы с ленточной диаграммой снабжены указывающей стрелкой и шкалой давлений. Прибор изготовляется на различные давления до 500 *кг/см*^{2}. Для давлений до 6 *кг/см*^{2} применяется одна трубка Бурдона; для более высоких давлений две параллельные трубки.

Точность прибора $\pm$ 2% от предела шкалы.

Манометры с телепередачей. Передача показаний манометров на расстояние может осуществляться электропередатчиками различных систем.

В пружинных манометрах применяются омические и индукционные электропередатчики. Омические передатчики представляют собой реостатное устройство, связанное с осью стрелки манометра и изменяющее свое сопротивление пропорционально углу поворота оси.

Переменное сопротивление выполняется в виде кольцевой стеклянной трубки, частично заполненной ртутью, внутри которой расположена платино-родиевая спираль, являющаяся сопротивлением. При повороте кольца бо́льшая или меньшая часть спирали замыкается ртутью, что изменяет величину сопротивления спирали.

Другой вариант омического передатчика состоит из неподвижного барабанчика, на котором зигзагообразно уложена проволока сопротивления. По сопротивлению скользят щетки, вращающиеся от оси манометра. Перемещение щеток изменяет отношение двух плеч сопротивления. Вторичным прибором омических передатчиков служит омметр или неравновесный мостик Уитстона.

Недостатки омических передатчиков сводятся к следующему:

а) питание постоянным током от аккумуляторов или специальных выпрямителей;

б) сопротивление движению стрелки манометра, вызываемое трением токоподводящей щетки. В ртутном омическом устройстве застревание капелек ртути в спирали и возникающие отсюда ошибки. Поэтому омические передатчики выходят из употребления.

Значительно удобнее и надежнее индукционные передатчики, питание которых производится непосредственно от сети переменного тока или через понижающий трансформатор.

В основном применяются две телепередаточных системы: логометр Гейгера и индукционный мостик.

Телепередаточная система (логометр) Гейгера (рис. 23) составляется из двух аналогичных приборов: передатчика *A* и вторичного прибора *B*. Передатчик состоит из незамкнутого серпообразного железного сердечника *1*, охватываемого двумя диаметрально расположенными катушками *2*. Плечо *3* из немагнитного металла связывает сердечник с осью вращения, соединенной с осью стрелки манометра.

Вторичный прибор состоит из тех же деталей, но на оси вращения сердечника насажена указательная стрелка *4*, двигающаяся по шкале *5*. Схема питается переменным током напряжением 5—8 *в* от трансформатора *6* типа Гном.

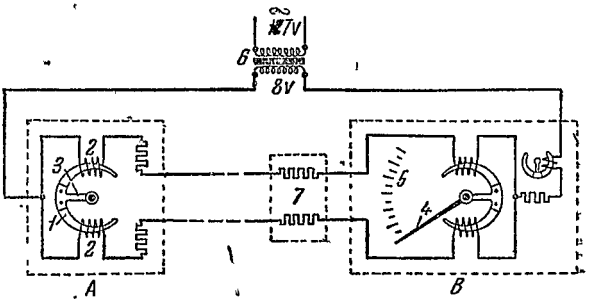


Рис. 23. Схема логометра Гейгера:
A — передатчик; *B* — вторичный прибор; *1* — серпообразный сердечник; *2* — катушки; *3* — плечо сердечника; *4* — указательная стрелка; *5* — шкала; *6* — трансформатор питания; *7* — подгоночные катушки.

Сопротивление соединительных проводов должно быть равно 5 ом. Для подгонки в соединительные провода включены подгоночные катушки *7*. Точность передатчика ±1,5%, суммарная точность вторичного прибора ±3,0% от предельного значения шкалы.

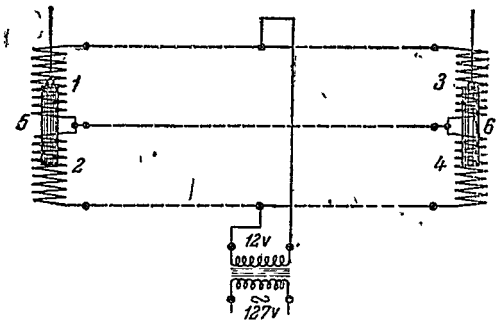


Рис. 24. Схема индукционного мостика:
1—2 — катушки передатчика; *3—4* — катушки вторичного прибора; *5—6* — сердечники катушек.

Колебания напряжения в сети сравнительно мало отзываются на точности показаний. Изменение напряжения сети на 20% вызывает ошибку приборов ±1,0%.

Схема индукционного мостика (рис. 24) включает в себя две пары индукционных катушек *1—2* и *3—4*, соединенных по схеме моста Уитстона. Одна пара катушек (*1—2*) является передатчиком, другая (*3—4*) приемником.

В обеих парах катушек помещены железные подвижные сердечники *5* и *6*. Сердечник *5* передатчика связан рычажной передачей с свободным концом трубки манометра, а сердечник *6* вторичного прибора рычагом и секторной передачей с указывающей стрелкой.

Перемещение сердечника передатчика вызывает нарушение равновесия мостика, вследствие чего в уравнительном (нулевом)

проводе появляется ток, вызывающий изменение магнитных полей катушек вторичного прибора и соответственное втягивание его сердечника. Полный ход сердечников 30,5 *мм*. Угол шкалы вторичного прибора 270°.

Передатчик питается переменным током 110—120 *в* от сети, допуская колебания напряжения ± 30%. Сила тока 0,4—0,5 *а*.

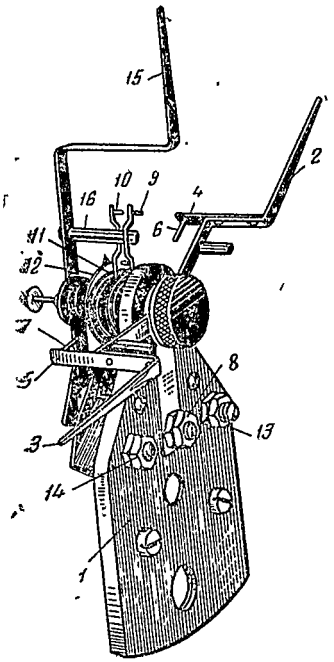


Рис. 25. Механизм контактного манометра:
1 — эбонитовое основание; *2* и *3* — контактные стрелки; *4* и *5* — пластинки контактных штифтов; *6* и *7* — контактные штифты; *8* — контактный винт; *9* и *10* — контактные рычажки; *11* и *12* — спиральные пружинки; *13* и *14* — клеммы; *15* — указательная стрелка манометра; *16* — эбонитовый штифт стрелки.

Контактный манометр применяется для передачи звуковых или световых сигналов при переходе назначенных пределов давления.

Контактный манометр состоит из двух независимых частей—манометрической и контактной, смонтированных в одном цилиндрическом корпусе. Манометрическая часть представляет обычный манометр Бурдона с указывающей стрелкой и шкалой. Механизм контактной части (рис. 25) состоит из эбонитового основания *1*, на котором размещены стрелки *2* и *3*, отмечающие допустимые пределы давления. Стрелки *2* и *3* переставляются вращением головки на стекле манометра. Стрелки *2* и *3* несут на себе пластинки *4* и *5* с контактными штифтами *6* и *7*. Контактные штифты металлически соединены с контактным винтом *8*, служащим для присоединения провода от источника тока.

Далее, на том же эбонитовом основании укреплена ось, вокруг которой вращаются контактные рычажки *9* и *10*, изолированные друг от друга и от оси. Рычажки *9* и *10* соединены через спиральные пружинки *11* и *12* с клеммами *13* и *14*. Указательная стрелка манометра *15* эбонитовым штифтом *16*, укрепленным на ней, при своем движении увлекает контактные рычажки *9* и *10*.

При повышении давления стрелка *15* будет двигаться вправо по шкале, отодвигая контактный рычажок *10*. Рычажок *9* будет следовать за стрелкой под действием пружинки *11* до встречи со штифтом *6*. Прикосновение рычажка *9* к штифту *6* замкнет ток сигнальной линии максимального давления.

Дальнейшее движение стрелки манометра вправо ничем не ограничено, так как рычажок *10* может отклоняться дальше, толкаемый стрелкой манометра, а рычажок *9*, задержанный штифтом *6*, будет оставаться неподвижным. При падении давления стрелка манометра пойдет влево. Дойдя до рычажка *9*, она сни-

мет его со штифта *6*, разомкнув контакт максимального сигнала, и поведет его дальше с собой. Рычажок *10* будет следовать за стрелкой до встречи со штифтом *7* минимального контакта, где и остановится, замкнув линию минимального сигнала.

Электрическая схема соединения контактного манометра приведена на рис. 26. Прибор может питаться током непосредственно от сети при напряжении до 220 *в*. Во избежание разрушения контактов сила тока не должна превышать 0,2 *а* при 65 *в* или 0,1 *а* при большем напряжении.

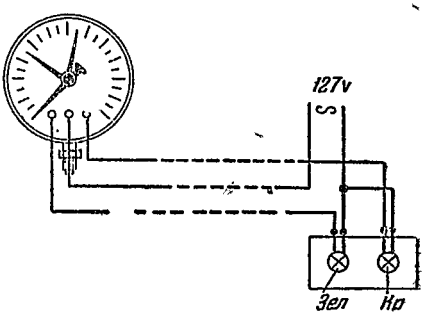


Рис. 26. Электрическая схема контактного манометра.

Прибор изготовляется диаметром 150, 200 и 300 *мм* для давлений от 1,0 до 2000 *кг/см²*.

Контактный манометр применяется как сигнализирующий прибор в тех случаях, когда увеличение давления сверх предельного является опасным для установки или когда колебания давления нарушают течение технологического процесса. Контактный манометр применяется также в системах автоматического регулирования, приводя в действие замыканием контактов регулирующий механизм.

Контрольные манометры. Контрольные манометры являются переносными приборами, применяемыми для поверки показаний рабочих манометров и как измерительные приборы при испытаниях аппаратов, работающих под давлением, и при некоторых лабораторных работах.

Контрольные манометры отличаются от рабочих большей тщательностью изготовления и наличием двух параллельных трубок Бурдона с независимыми передаточными механизмами и указывающими стрелками. Дублирование измерительных частей прибора позволяет немедленно установить неисправность манометра по расхождению показаний стрелок.

Контрольные манометры снабжаются рычажным передаточным механизмом, имеющим лишь два шарнира, а следовательно, наименьшее количество зазоров и пар трения, что обеспечивает большую чувствительность и точность прибора. Шкала контрольного манометра эксцентричная, гравированная на металлической пластинке.

Контрольные манометры для давлений до 50 *кг/см²* изготовляются с фланцем для присоединения к фланцу трехходового крана рабочего манометра. Присоединение производится винтовой струбцинкой (прилагаемой к прибору) на прокладке.

Для давления выше 50 *кг/см²* контрольный манометр снабжается обычным ниппелем с резьбой, так как присоединение струбцинкой при высоких давлениях опасно.

Контрольный манометр обязательно снабжается игольчатым

вентилем для медленной и плавной подачи давления на манометр во избежание его порчи.

Контрольный манометр помещается в специальном футляре для сохранности при перевозках. Чтобы избежать порчи манометра от толчков и тряски при перевозках, трубки манометра держат при некотором давлении, равном 4—5% наибольшего значения шкалы. Если при открытии вентиля обе стрелки манометра станут на нуль, манометр может считаться исправным и годным к работе.

Точность контрольного манометра должна равняться $\pm$ 1,0% предельного значения шкалы, а с введением поправок $\pm$ 0,5%.

Образцовые манометры. Образцовыми манометрами называются манометры Бурдона высокой точности, служащие для поверки рабочих и контрольных приборов и для научно-исследовательских лабораторных работ.

Повышенная точность образцовых манометров достигается применением материалов высокого качества и тщательностью изготовления, пригонки и сборки деталей. Образцовые манометры изготовляются только с бурдоновскими трубками и секторным передаточным механизмом.

Изготовляются следующие образцовые приборы: вакуумметры до 760 *мм* рт. ст., манометры для давлений 1,5; 5; 10; 25; 50; 150; 250; 500; 1000 и 2000 *кг/см*^{2}.

Шкала образцового манометра имеет угол в 300°, чем отличается от рабочих приборов, имеющих угол шкалы 270°.

По градуировке шкал образцовые манометры делятся на приборы с именованной шкалой и приборы с градусной шкалой.

Именованная шкала градуирована в принятых единицах давления (*мм* рт. ст.; *кг/см*^{2}); градусная же шкала имеет деления в угловых градусах от 0 до 300° через один градус.

Градусные шкалы в образцовых манометрах применяются чаще, так как они остаются одинаковыми для всех приборов, что не только удешевляет производство, но устраняет ошибки, возможные при индивидуальной разметке. Манометры с градусными шкалами регулируются так, чтобы при отсутствии давления стрелка стояла на нуле, а при максимальном давлении, для которого построен прибор, останавливалась на последнем трехсотом штрихе.

Предельное давление, для измерения которого предназначен прибор, указывается на циферблате таким образом «10 *кг/см*^{2}=300°».

Так как шкала прибора не строго пропорциональна, то для перевода градусов шкалы в единицы давления необходима переводная таблица или номограмма, построенная на основании градуировки прибора по поршневому или ртутному манометру в 15—20 точках шкалы.

Поверку градуировки образцового прибора необходимо периодически повторять, так как пружинные манометры довольно быстро изменяют свои показания.

Образцовые манометры с именованной шкалой также должны иметь поверочное свидетельство, так как без него нельзя получить максимально возможную точность измерения.

Установленная общесоюзным стандартом точность образцовых манометров с учетом поправок должна быть:

Для приборов до 2 *кг/см*^{2}	$\pm$0,35%
„ „ от 2 до 500 *кг/см*^{2}	$\pm$0,2%
„ „ выше 500 *кг/см*^{2}	$\pm$0,35%

Чувствительность образцовых манометров лежит в пределах 0,04—0,05% максимального давления. Для отдельных экземпляров чувствительность доходит до 0,02%.

Манометры с геликоидальной трубкой. Манометры с геликоидальной трубкой основаны на принципе трубки Бурдона и предназначены для стационарных производственных измерений.

Рабочим органом этих приборов служит плоская трубка, свернутая в цилиндрическую (винтовую) спираль с 6—9 витками. Геликоидальную трубку можно рассматривать как ряд трубок Бурдона, соединенных последовательно друг с другом, вследствие чего перемещение свободного конца трубки и вращающий момент значительно больше, чем у трубки Бурдона.

Манометры с геликоидальной трубкой преимущественно используются в качестве телепередатчиков и регистрирующих приборов, а также для манометрических термометров.

На рис. 27 изображен механизм индукционного передатчика манометра с геликоидальной трубкой. Свободный конец геликоидальной трубки *1* манометра шарнирно связан тягой *2* с коленчатым рычагом *3*. Рычаг *3* скреплен с рычагом *4*, вращаясь вокруг общей оси *5*. Рычаг *4* несет на одном конце подвеску *6* сердечника *7* индукционных катушек *8*, а на другом — уравновешивающий груз *9*. Рычаг *3* тягой *10* соединен с секторным механизмом *11* указывающей стрелки *12*.

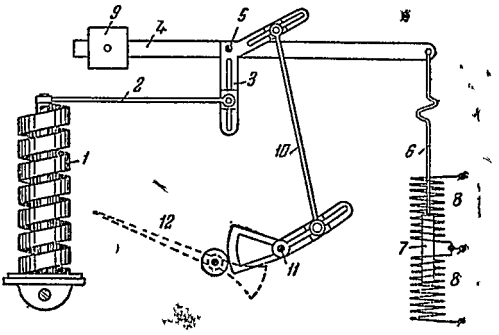


Рис. 27. Механизм передатчика манометра с геликоидальной трубкой:
1 — геликоидальная трубка; *2* — тяга; *3* — коленчатый рычаг; *4* — передаточный рычаг; *5* — ось вращения рычагов; *6* — подвеска сердечника; *7* — сердечник; *8* — индукционные катушки; *9* — уравновешивающий груз; *10* — тяга секторного механизма; *11* — секторный механизм; *12* — указывающая стрелка.

Приемный механизм имеет аналогичное устройство за исключением отсутствующих в нем манометрической трубки *1*, тяги *2* и вертикального плеча рычага *3*.

Манометры с геликоидальной пружиной строятся для давлений от 3 до 120 *кг/см²*.

Манометры с плоской спиральной трубкой имеют воспринимающий орган в виде элиптической или плоской трубки, согнутой в архимедову спираль.

Манометры этого типа применяются только в качестве манометрических термометров. Для измерения давлений не изготовляются.

10. Мембранные манометры

Мембранные манометры делятся на манометры с плоской мембраной и с цилиндрической (сильфонной) мембраной.

Манометры с плоской мембраной. Измерительной деталью манометра (рис. 28) является тонкая металлическая мембрана *1*, зажатая между двумя фланцами *2* и *3*, из которых фланец *2* имеет ниппель с винтовой нарезкой для присоединения манометра

к трубопроводу. По оси ниппеля проходит сквозной канал, подводящий измеряемое давление во внутреннюю полость фланца к мембране.

Верхний фланец *3* отлит вместе с корпусом прибора и также снабжен каналом, соединяющим верхнюю полость фланца с внутренним пространством корпуса манометра.

Для увеличения эластичности мембрана гофрирована круговыми концентрическими волнами.

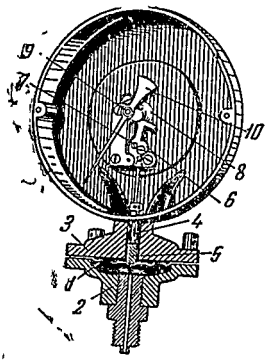


Рис. 28. Манометр с плоской мембраной: *1* — металлическая мембрана; *2* и *3* — фланцы чашек манометра; *4*—толкатель; *5* — штифт мембраны; *6*—зубчатый сектор; *7* — ось сектора; *8* — шестеренка; *9* — ось шестеренки; *10* — указательная стрелка.

Под действием давления мембрана изгибается кверху.

Величина деформации мембраны пропорциональна давлению и является его мерой.

Передача деформации мембраны на указательную стрелку производится через штифт *5*, укрепленный в центре мембраны, толкатель *4*, шарнирно соединенный одним концом со штифтом *5*, а другим концом с зубчатым сектором *6*, вращающимся вокруг оси *7*.

Сектор сцепляется с шестеренкой *8*, на оси которой *9* насажена указательная стрелка *10*.

Деформация мембраны под действием давления весьма невелика, достигая в центре мембраны величины 1,5—2 *мм*, что создает необходимость большого передаточного числа механизма и уменьшает чувствительность и точность прибора.

Удовлетворительного метода расчета гофрированных мембран не имеется. Известно лишь, что с увеличением рабочего давления необходимо увеличивать толщину, уменьшать диаметр мембраны и применять материал с более высоким модулем упругости. Мембраны на малые давления изготовляются из латуни и нейзильбера, для больших давлений из стали. Несмотря на возможность изменения геометрических размеров и материала мембран, манометры с пластинчатыми мембранами строятся на весьма ограниченный диапазон давлений: от 0,2 до 30 *кг/см*^{2}.

При всех этих недостатках манометры с плоской мембраной находят довольно широкое применение.

Малая масса мембраны делает этот манометр менее чувствительным к толчкам и тряске. Короткий прямой и достаточно широкий канал, подводящий давление к мембране, менее подвержен засорению, чем трубка Бурдона. Наконец, мембрану легче защитить от воздействия активной среды покрытием нижней поверхности тонкой фольгой из химически стойкого материала. Применяются манометры с защитной фольгой из красной меди, серебра, платины и других металлов.

Недостатком мембранных манометров является значительно больший, чем у трубчатых манометров, температурный коэфици-

ент прибора. В то время как повышение температуры до 60° вызывает у бурдоновских манометров погрешность в 1—1,5%, у мембранных манометров при той же температуре ошибка достигает 6%.

Мембранный тягомер. К мембранным манометрам относятся так называемые мембранные тягомеры, т. е. приборы для измерения малых давлений и разрежений порядка от 15 до 150 *мм* вод. ст.,

Основная часть этих приборов эластичная плоская коробка (капсула), состоящая из двух мембран, соединенных своими краями. Внутрь коробки подводится измеряемое давление, под действием которого мембраны прогибаются наружу. Деформация коробки системой рычагов преобразуется во вращение оси, на которой закреплена указывающая стрелка. Приборы выполняются обычной круглой формы с эксцентричной шкалой и профильного типа.

В некоторых типах мембрана нагружена плоской пружиной, уравновешивающей давление, в этом случае мембрана играет роль поршня, передающего давление на пружину.

На рис. 29 изображен мембранный тягомер профильного типа, устройство которого заключается в следующем. В алюминиевом корпусе *1* помещена мембранная коробка *2*, состоящая из двух гофрированных дисковых мембран, спаянных по окружности. К нижней мембране в центре припаяна втулка *3*, при помощи которой мембранная коробка крепится к корпусу прибора. В центральное отверстие втулки впаяна трубка *4*, соединяющая внутреннюю полость мембранной коробки с измеряемым давлением. К верхней мембране припаян латунный диск *5*, несущий вертикальный штифт *6*. В верхней части штифта укреплена шпилька, на которую опирается плоская пружина *14*, создающая противодействующую силу и обеспечивающая однозначное положение стрелки прибора.

На штифт *6* опирается плечо углового рычага *7*, вращающегося на оси *8*. Второе плечо рычага *7* соединено проволочной тягой *9* с кривошипом *10*, насаженным на ось *11* указательной стрелки *12*. Спиральная пружинка *13*, закрепленная на оси *11*, поддерживает всю рычажную систему в напряженном состоянии, устраняя мертвые ходы вследствие зазоров в соединениях.

Если соединить полость мембранной коробки с разрежением, коробка сожмется, штифт *6* опустится, рычаг *7* повернется на некоторый угол на оси *8* по часовой стрелке, вызывая вращение оси *11* и перемещение указательной стрелки *12* по шкале *15*, градуированной в *мм* вод. ст.

Для корректировки нуля прибора, т. е. для совмещения конца стрелки с нулем шкалы в тех случаях, когда при отсутствии разрежения в полости мембраны стрелка почему-либо не становится на нуль, ось *8* рычага *7* закреплена на рычаге *16*.

Ось *17* рычага *16* укреплена в детали, жестко скрепленной с корпусом прибора. Рычаг *16* нагружен пружинкой *20*, стремящейся повернуть его по часовой стрелке, этому отклонению рычага *16* препятствует винт *19*, конусообразный конец которого входит в отверстие, просверленное в пластинчатом отростке *18* рычага *16*. Вращение винта *19* в ту или другую сторону перемещает конус винта в отверстии отростка *18* рычага *16*, что вызывает поворот рычага *16* на небольшой угол. Отклонение рычага *16* изменяет положение оси *8*, что в свою очередь вызывает поворот рычага *7* и оси *11*. Стрелка *12* передвигается на небольшое расстояние по шкале и может быть совмещена точно с нулем шкалы.

Мембранные коробки, сложные мембраны и сильфоны. Замена одинарной мембраны мембранной коробкой повышает точность и чувствительность прибора, так как величина деформаций увеличивается почти в два раза.

Для дальнейшего увеличения деформаций применяют сложные мембранные коробки, состоящие из нескольких мембран, собранных в пакет, или вместо плоских мембран применяют гармониковую мембрану (рис. 30), так называемый *сильфон*, представляющую тонкостенную гофрированную трубку с впаянными жесткими донышками. При изменении давления внутри или снаружи сильфона последний изменяет свою длину в ту или другую сторону.

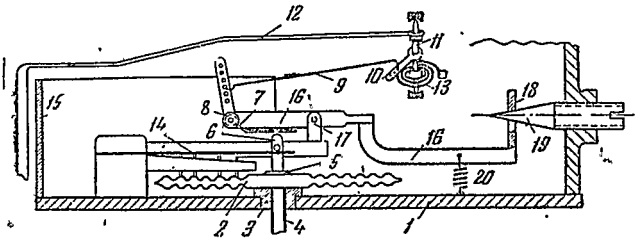


Рис. 29. Мембранный тягомер:
1 — корпус прибора; *2*—мембранная коробка; *3*—втулка коробки; *4* — трубка для подачи давления; *5*—диск для крепления штифта; *6* — штифт; *7* — угловой рычаг; *8* — ось рычага; *9* — тяга рычага; *10* — кривошип; *11* — ось стрелки; *12* — указательная стрелка; *13* — спиральный волосок; *14* — пружина мембраны; *15* — шкала; *16* — опорный рычаг; *17* — ось опорного рычага; *18* — отросток опорного рычага; *19* — регулирующий винт; *20* — пружинка опорного рычага.

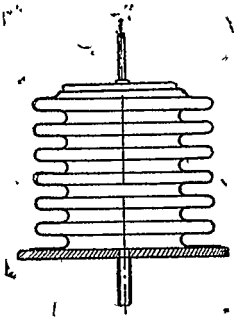


Рис. 30. Сильфонная мембрана.

Сложные мембранные коробки и сильфоны применяются в основном не в измерительных приборах, а в регуляторах давления и температуры.

Однако и те и другие могут быть с успехом использованы в приборах для измерения давления и в манометрических термометрах.

11. Пружинные диференциальные манометры

Трубчатый диференциальный манометр представляет собой обычный манометр с двумя трубками Бурдона (рис. 31). Обе трубки независимы друг от друга и каждая имеет отдельный присоединительный ниппель. Каждая трубка действует на свой передаточный механизм, причем оси обоих механизмов концентричны, т. е. одна из осей трубчатая и внутри нее проходит другая ось. На внутренней оси насажена указательная стрелка, движущаяся по неподвижной круговой шкале, а трубчатая ось несет подвижную круговую шкалу, концентричную с неподвижной.

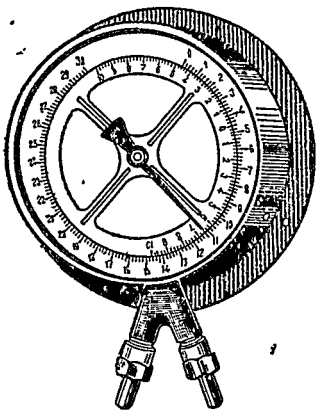


Рис. 31. Пружинный диференциальный манометр.

Подвижная шкала вправо от нуля имеет деления, совпадающие с неподвижной шкалой, и кроме того деления влево от нуля на протяжении одной четверти внешней шкалы (рис. 31).

Ниппель трубки, управляющей указательной стрелкой, присоединяется к большему давлению, другой ниппель к меньшему.

Под действием большего давления указательная стрелка передвинется на некоторый угол и величина давления будет показана на неподвижной шкале. Одновременно под действием меньшего давления внутренняя подвижная шкала также переместится на определенный угол. Вследствие этого указательная стрелка прямо покажет разность давлений на подвижной шкале.

В самом деле, пусть указательная стрелка повернулась на угол α, а подвижная шкала на угол β. Углы поворота, как мы знаем, прямо пропорциональны давлениям. Тогда число делений подвижной шкалы между нулем подвижной шкалы и указательной стрелкой будет соответствовать значению $\alpha - \beta$ или, что то же, значению $p - p_1$, таким образом отсчет по внутренней шкале дает сразу разность давлений.

Для случаев, когда в процессе измерения давление p_1 окажется больше p, служит продолжение подвижной шкалы влево от нуля. Конечно, измерение возможно будет лишь до тех пор, пока разность давлений не превысит значения отрицательной шкалы.

Таким образом, трубчатый диференциальный манометр дает возможность получить одновременно значения большего давления, меньшего давления и разности давлений. Точно так же трубчатый диференциальный манометр дает возможность измерять разность давлений и в тех случаях, когда разность давлений меняет свой знак. Эти свойства прибора являются крупными его достоинствами.

К недостаткам прибора следует отнести невозможность точного измерения малых разностей давления при высоком значении рабочего давления и значительно бо́льшие погрешности прибора, складывающиеся из погрешностей обоих измерительных механизмов.

Если мы имеем давления p_1 и p_2, причем $p_1 > p_2$, то разность давлений:

$$p = p_1 - p_2, \tag{50}$$

а наибольшая относительная ошибка:

$$\frac{dp}{p} = \frac{dp_1 - dp_2}{p_1 - p_2}. \tag{51}$$

Из этого уравнения видно, что относительная ошибка тем больше, чем меньше разность давлений.

Погрешность увеличивается еще за счет неточного совпадения неподвижной и подвижной шкал, которое всегда имеет место. Поэтому пользоваться трубчатым диференциальным манометром следует лишь при больших значениях разности давлений, учитывая одновременно величину возможной погрешности.

Мембранный диференциальный манометр представляет собой обычный пластинчатый манометр, с тем отличием, что большее давление подводится к мембране снизу, а меньшее сверху. Для этого имеется специальный ниппель с трубкой, подведенной к верхней камере мембраны. Верхняя камера отделена от корпуса манометра сальником, через который проходит тяга от мембраны к передаточному механизму. Мембрана испытывает одновременно давления с обеих сторон, и ее прогиб будет пропорционален разности давлений. Следовательно, указывающая стрелка покажет на шкале величину искомой разности давлений. Пластинчатые диференциальные манометры выполняются для измерения разностей давления от 0,3 до 3 *кг/см*^{2} при рабочем давлении до 50 *кг/см*^{2}.

К недостаткам конструкции относится наличие уплотняющего сальника, следствием которого является увеличение вредного трения и возможность неплотности, приводящей к загрязнению и порче прибора. Невозможность измерения этим прибором рабочего давления также является существенным неудобством.

Достоинством прибора является большая точность измерений, достигающая значения 1—2% от предельного значения шкалы.

Необходимо при работе с прибором строго следить за одновременностью подачи обоих давлений на мембрану, так как одностороннее давление при значении, превышающем пределы шкалы, вызывает окончательную порчу прибора.

Мембранный дифференциальный тягомер. Конструкция мембранного дифференциального тягомера тождественна с мембранным тягомером, описанным выше (стр. 53), с тем лишь отличием, что в дифференциальном тягомере корпус выполнен герметичным и полость корпуса присоединяется отдельным ниппелем к меньшему давлению. При этом мембранная коробка испытывает давления снаружи и изнутри и ее прогиб пропорционален разности давлений, величина которой указывается стрелкой прибора на шкале.

Прибор изготовляется на два предела измерения: 0—30 и 0—50 *мм* вод. ст. Цена деления шкалы 1 *мм* вод. ст. Точность прибора $\pm 2\%$ от предела шкалы.

12. Электрические манометры

Общие сведения. Измерение с достаточной точностью весьма малых давлений, порядка десятых и сотых долей *мм* водяного столба или тысячных долей *мм* ртутного столба, с одной стороны, и сверхвысоких давлений, порядка нескольких тысяч килограммов на 1 $см^2$, с другой, описанными выше приборами невозможно.

В то же время в технике, в частности в химических производствах, приходится встречаться с необходимостью измерения в указанных областях давлений.

В этих случаях применимы приборы, основанные на электрических явлениях, так или иначе связываемых с давлением.

Для измерения давлений используются следующие методы: емкостный метод измерения малых деформаций, пьезо-электрический метод, метод изменения сопротивления сжатого проводника и метод изменения теплопроводности среды. Первый метод пригоден для весьма малых и для сверхвысоких давлений, второй для высоких и быстро меняющихся давлений, третий для сверхвысоких давлений и последний для крайне низких давлений.

Емкостные манометры. Емкостный манометр для низких давлений (рис. 32) состоит из камеры *1*, между фланцами которой зажата тонкая металлическая мембрана *2*, воспринимающая давление, подводимое к камере по трубке *3*. Эта мембрана служит одной из обкладок конденсатора. Второй обкладкой конденсатора служит металлический диск *4*, жестко связанный со стержнем *5*, позволяющим при передвижении

диска *4* изменять расстояние между обкладками конденсатора. Диск *4* со стержнем *5* тщательно изолирован от камеры. Деформация мембраны под действием давления, изменяя расстояние между обкладками, изменяет емкость конденсатора. Измеряя тем или иным методом величину емкости конденсатора, можно судить о величине давления и определить ее, если прибор отградуирован по какому-либо точному жидкостному манометру.

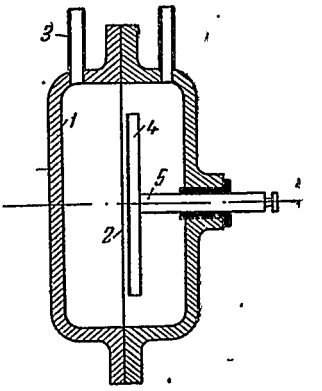


Рис. 32. Емкостный манометр:
1 — камера манометра; *2* — мембрана; *3* — трубка для подачи давления; *4* — металлический диск; *5* — стержень диска.

Описанный емкостный манометр может быть применен для измерения различных давлений в зависимости от толщины и диаметра мембраны. Ленинградским теплотехническим институтом выполнен емкостный манометр для измерения давлений до 0,2 *мм* рт. ст. с точностью до 0,005 *мм* рт. ст.

Мессдозы. Емкостный измеритель давлений другого вида служит для измерения давлений в опорных деталях машин (давление на подшипники в валковых смесителях, дробилках и т. п.). Подобные приборы называются мессдозами. Один из конструктивных вариантов конденсаторной мессдозы показан на рис. 33.

Мессдоза состоит из стального основания *1* и двух стальных дисков *2* и *3*, жестко соединенных центральным болтом *4*. Болтами *5* диски жестко скреплены с основанием *1*. Оба диска имеют кольцевые выточки *6*, благодаря которым при деформации дисков под нагрузкой средняя часть их остается плоской.

Диски составляют одну пластину конденсатора. Другая пластина *7* помещена в полости основания и тщательно от него изолирована. Провод *8* от пластины *7* проходит сквозь канал в основании и так же тщательно от него изолирован.

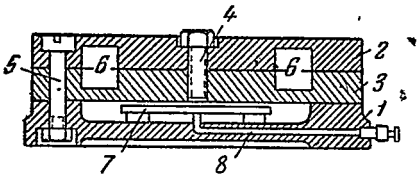


Рис. 33. Емкостная мессдоза:
1 — основание мессдозы; *2* и *3* — стальные диски; *4* — центральный болт; *5* — скрепляющие болты; *6* — кольцевые выточки; *7* — пластинка конденсатора; *8* — провод.

Расстояние между пластинами конденсатора 0,5—1,0 *мм*. При нагрузке на диски *2* и *3* они прогибаются, расстояние между пластинами конденсатора и его емкость изменяются, что позволяет судить о величине нагрузки.

Измерение емкости конденсатора можно выполнить либо емкостным мостиком, либо по методу половины резонансной кривой.

Электрическая схема емкостного мостика Карстена и Вальтера представлена на рис. 34. Схема построена по принципу неравновесного мостика. Ток, возникающий в диагонали моста, величина которого будет зависеть от величины емкости мессдозы, выпрямляется и усиливается электронной лампой *L* и измеряется чувствительным амперметром *A*. Шкала амперметра может быть проградуирована непосредственно в единицах давления или нагрузок.

Схема измерения по методу половины резонансной кривой дана на рис. 35. Колебательный контур *D*, состоящий из конденса-

торного манометра C_1, постоянного конденсатора C_2 и катушки самоиндукции 1, индуктивно связан через катушку 4 с генераторным контуром B. Генераторный контур состоит из лампы L_1, катушек самоиндукции 2 и 3 и постоянного конденсатора C_3. Ток колебательного контура A подается на сетку лампы L_2, где выпрямляется и усиливается. Усиленный анодный ток лампы L_2 измеряется точным амперметром A.

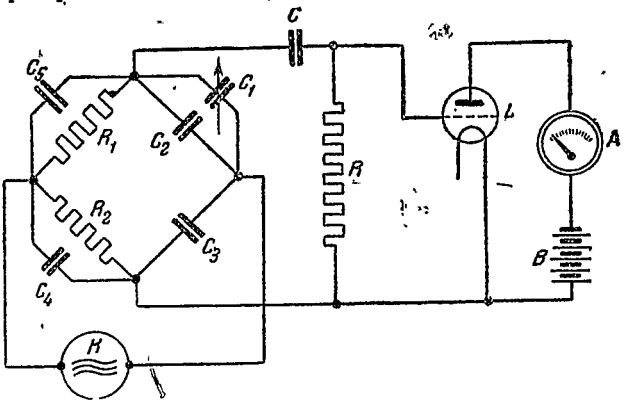


Рис. 34. Емкостный мостик Карстена и Вальтера: D — электронная лампа; A — амперметр; C_1 — мессдоза; C_2—C_5 — постоянные емкости мостика; R_1 и R_2 — постоянные сопротивления мостика; C — конденсатор усилителя; R — сопротивление усилителя; B — анодная батарея; K — генератор высокой частоты.

При настройке генераторного и измерительного контура, близкой к резонансу, малейшее изменение емкости конденсаторного датчика вызывает большое изменение анодного тока в измерительном контуре. Настройка ведется

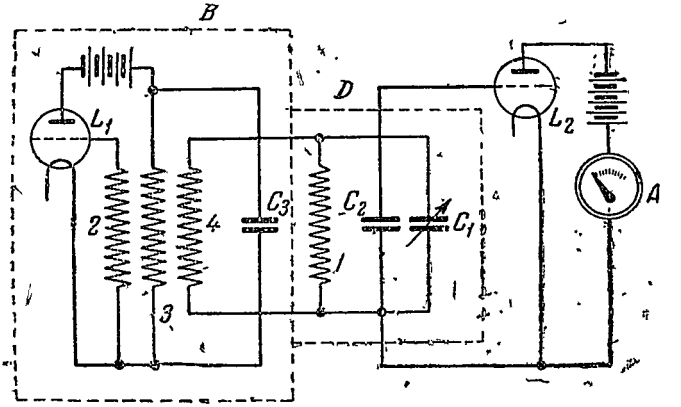


Рис. 35. Схема измерения емкости методом резонанса: B — генераторный контур; D — колебательный контур; C_1 — емкостный манометр; C_2—C_3—постоянные конденсаторы; 1, 2, 3, 4 — катушки самоиндукции; L_1, L_2—электронные лампы; A — амперметр.

так, чтобы в пределе измерения все ее изменения укладывались на прямолинейном участке восходящей ветви резонансной кривой, не достигая точки резонанса, где измерения не достоверны.

Пьезо-электрический манометр наиболее применим для измерения колебаний давлений при значительной частоте этих колебаний. Иными словами, пьезо-электрический манометр является безинерционным индикатором для высокой частоты колебаний давления.

Действие прибора основано на пьезо-электрическом эффекте, заключающемся в появлении электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллов, подвергнутых растяжению или сжатию.

Пьезо-электрический эффект наблюдается у кристаллов кварца, турмалина, сегнетовой соли и др. Однако для использования в пьезо-электрическом манометре наиболее удобен кварц, так как он обладает высокими механическими свойствами и, кроме того, в интервале температур от 0 до 500° сохраняет прямую пропорциональность между величиной силы и электрического заряда:

$$q = kF, \tag{52}$$

где q — величина электрического заряда в единицах CGS;
F — действующая сила в динах;
k — пьезо-электрическая постоянная или постоянная Кюри, равная $6{,}45 \cdot 10^{-8}$.

Конструкция пьезо-электрического манометра приведена на рис. 36. Прибор состоит из стального цилиндра *1*, закрытого с обоих концов навинчивающимися крышками *2* и *3*. Крышка *3* снабжена ниппелем *4* для присоединения к трубопроводу и каналом *5* для подвода давления внутрь цилиндра. В нижней части цилиндра впаяна мембрана *6*, поверхность которой тщательно обработана на плоскость. На мембрану опирается подкладка *7* с цилиндрической выточкой для помещения кварцевой пластинки *8*. Кварцевая пластинка расположена так, чтобы поверхность с положительным зарядом была обращена к подкладке *7*. На кварцевой пластинке лежит прокладка *9*, имеющая цилиндрические выточки с обеих сторон. Далее находится вторая кварцевая пластинка *10*, расположенная так, что поверхность с положительным зарядом обращена вверх. Пластинка *10* покрывается подкладкой *11*, сверх которой помещен стальной шарик *12*, нажимаемый верхней крышкой *2*. От прокладки *9* идет проводник *13*, выходящий из цилиндра через канал *14* и втулку *15*. Проводник тщательно изолирован от корпуса янтарными втулочками.

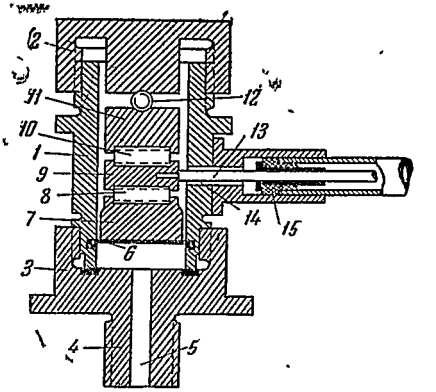


Рис. 36. Пьезо-кварцевый манометр:

1 — стальной цилиндр; *2* и *3* — крышки цилиндра; *4* — ниппель; *5* — подводящий давление канал; *6* — мембрана, *7* и *11* — стальные подкладки; *8* и *10* — кварцевые пластинки; *9* — стальная прокладка; *12* — опорный шарик; *13* — проводник; *14* — канал проводника; *15* — изолирующая втулка.

Измерительная схема, работающая без расходования зарядов, представлена на рис. 37.

Напряжение пьезо-кварца подается на сетку первой лампы, вызывая соответственно колебание анодного тока этой лампы. Вторая лампа является усилительной. Колебания усиленного тока регистрируются шлейфовым или катодным осцилографом. При работе на шлейфовом осцилографе сопротивление R_2 закорачивается.

Шлейфовый осцилограф с собственной частотой 2000 герц и чувствительностью 10 *мм/ма* дает отклонение луча на 1 *кг* — от 10 до 20 *мм*.

Точность пьезо-кварцевого манометра находится в пределах 1,5% от предела измеряемого давления.

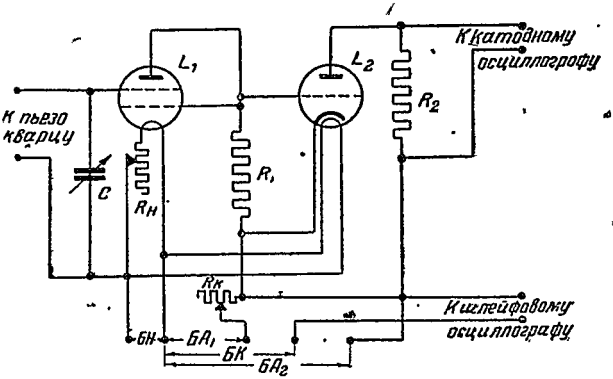


Рис. 37. Измерительная схема пьезо-кварцевого манометра:

L_1 и L_2 — электронные лампы; *БН* — батарея накала; $БА_1$ — анодное напряжение первой лампы; $БА_2$ — анодное напряжение второй лампы; *БК* — компенсационное напряжение; *С* — переменный конденсатор; R_1 и R_2 — анодные сопротивления; $R_н$ — реостат накала; $R_к$ — компенсационный реостат.

Манометр сопротивления основан на изменении сопротивления проводника, подвергнутого внешнему давлению. Изменение сопротивления пропорционально величине давления, что позволяет использовать это явление для измерения давлений.

Наиболее подходящим материалом для изготовления измерительного сопротивления является манганин, обладающий весьма малым температурным коэфициентом сопротивления, практически близким к нулю.

Манометры сопротивления применяются для измерения высоких и сверхвысоких давлений, так как изменение сопротивления от давления весьма невелико. Для манганина коэфициент изменения сопротивления:

$$\frac{1}{R_0} \cdot \frac{dR}{dp} = 2{,}528 \cdot 10^{-6}\ кг/см^2. \qquad (53)$$

Конструкция электрического манометра, разработанного криогенной лабораторией УФТИ, изображена схематически на рис. 38. Воспринимающей частью прибора является однослойная катушка *1* диам. 8 *мм* из манганиновой проволоки диаметром 0,05 *мм*, намотанной бифилярно. Сопротивление катушки 180—200 ом. Один конец катушки припаян к гайке *2*, а другой к медному стержню *3*. Стержень проходит через канал в гайке *2*, его центральное положение фиксируется эбонитовыми втулками *4* и *5*. Уплотнение стержня достигается набивкой из фибровых и резиновых колец *6*, сжатых гайкой *7*.

Гайка *2* ввертывается в корпус *8*, снабженный ниппелем *9* для присоединения к аппарату или трубопроводу, в котором измеряется давление.

Измерительным прибором может быть равновесный или неравновесный мостик Уитстона, подобный описанным далее для термометров сопротивления. Точность измерения достигает 0,05% от предельного давления.

Для получения постоянства показаний катушка после намотки должна быть подвергнута отжигу при температуре 125—130° в течение 20—24 час. в атмосфере азота.

Электрический вакуумметр Пирани. Для измерения глубокого вакуума порядка тысячных долей *мм* рт. ст. применяется электрический вакуумметр, основанный на тепловом принципе.

Проволочная спираль, нагреваемая током, приобретает при установившемся равновесном состоянии определенную температуру, зависящую от величины потерь тепла в окружающую среду.

Эти потери определяются теплопроводностью среды и величиной конвекции. С изменением разрежения теплопроводность и величина конвекции изменяются, вследствие чего изменяется величина потерь тепла и равновесная температура проводника, а следовательно, и его сопротивление.

При давлениях порядка 0,05—0,000005 *мм* рт. ст. теплопроводность газа линейно зависит от давления.

Измерение давления таким образом сводится к измерению сопротивления проводника, помещенного в пространство с измеряемым давлением.

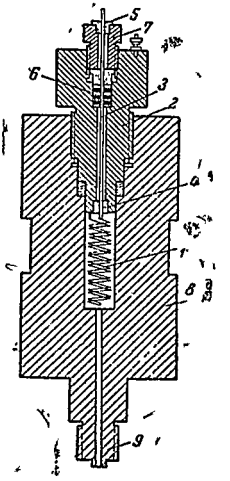


Рис. 38. Манометр сопротивления УФТИ:

1 — катушка манометра; *2* — гайка; *3* — медный стержень; *4* и *5*—эбонитовые втулки; *6*—набивка из фибровых и резиновых колец; *7* — уплотняющая гайка; *8* — корпус манометра; *9* — ниппель.

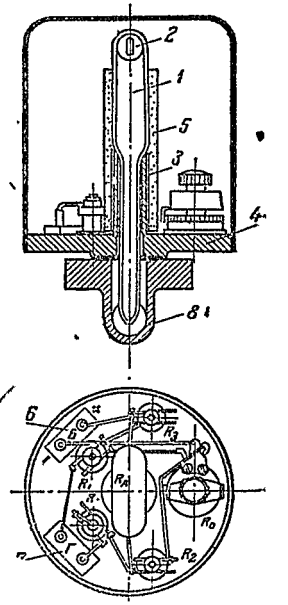


Рис. 39. Электрический вакуумметр Пирани:

1 — стеклянная ампула; *2* — платиновое сопротивление; *3* — стальная трубка; *4*—фланец; *5*—резиновая трубка; R_1, R_2 и R_3 — плечи мостика; R_a — сопротивление вакуумметра; R_0 — потенциометр для установки нуля; R_p — регулирующее сопротивление; *6*—клеммы питания; *7*—клеммы гальванометра; *8* — патрубок вакуумной линии.

Электрический вакуумметр Пирани, разработанный заводом Электросила, схематически представлен на рис. 39. Вакуумметр состоит из стеклянной ампулы *1*, в верхнем расширении которой помещено платиновое сопротивление *2*. Ампула вставлена в стальную трубку *3*, составляющую одно целое с фланцем *4*, и укреплена в ней толстостенной резиновой трубкой *5*, служащей одновременно уплотнением системы. На фланце *4* собрана схема мостика, состоящая из четырех катушек R_1, R_2, R_3 и R_a и переменного сопротивления R_0. На фланце укреплены также две эбонитовые дощечки *6* и *7* с клеммами для присоединения к источнику питания и гальванометру. Фланец *4* присоединяется к фланцу патрубка *8* вакуумной линии. Нижний конец ампулы *1*

имеющий небольшое отверстие, входит в вакуумпровод, и внутри ампулы устанавливается давление, равное давлению в вакуумной линии.

Измерительная схема вакуумметра Пирани, изображенная на рис. 40, состоит из неравновесного мостика Уитстона M, в одно из плеч которого включено сопротивление R_A из тонкой платиновой проволоки диам. 0,01 *мм*, заключенное в стеклянную ампулу, соединенную с измеряемым давлением.

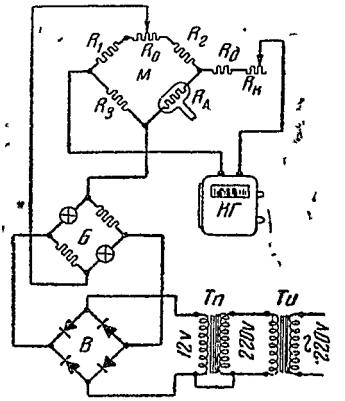


Рис. 40. Измерительная схема вакуумметра Пирани:

R_A — сопротивление вакуумметра; $КГ$ — контактный гальванометр; $Ти$ — изодирующий трансформатор; $Т_п$ — понижающий трансформатор; $В$ — купроксный выпрямитель; $Б$ — бареттер; $М$ — измерительный мостик; R_1, R_2, R_3 — плечи мостика; R_0 — потенциометр для регулирования нулевой точки; $R_д$, $R_к$ — регулировочные сопротивления.

Измерительным прибором является указывающей или контактный гальванометр $КГ$, включенный в диагональ мостика.

Шкала гальванометра градуирована в микронах ртутного столба от 0 до 10 μ рт. ст. Рабочий интервал шкалы 0—2 μ рт. ст.

Питание мостика производится от сети через изолирующий трансформатор $Ти$ 220/220 вольт и понижающий трансформатор (220/12 *в*) $Тп$, купроксный выпрямитель $В$ и железо-водородный бареттер $Б$, обеспечивающий постоянство напряжения, питающего мост тока.

Сила тока, питающего мостик, должна быть достаточной для нагрева вакуумного сопротивления до 200—300°.

Точность прибора в пределах рабочего интервала шкалы ±3%.

13. Установка и поверка манометров

Установка и обслуживание манометров. Обеспечение правильности показаний манометра и долговременности его службы зависит от тщательности установки и ухода за прибором.

В химической промышленности приборы для измерения давлений часто устанавливаются на тепловых аппаратах, работающих под давлением, например теплообменниках, выпарных, экстракционных и дестилляционных аппаратах, автоклавах и т. п. В этих случаях установка манометров выполняется аналогично установкам на паровых котлах. Так как во всех этих аппаратах измеряется давление паров или газов, необходимо устранить возможность непосредственного действия пара или газа, имеющего часто высокую температуру, на измерительную часть прибора — в пружинных манометрах — трубку Бурдона или мембрану.

В этих случаях перед манометром должна быть установлена сифонная трубка (рис. 41), заполняющаяся конденсатом и изолирующая пружину или вообще измерительную часть манометра от непосредственного соприкосновения с паром.

В случае, если газ, пар или его конденсат являются химически активными по отношению к материалу измерительной части манометра, например (в пружинных) трубки Бурдона, то вместо сифонной трубки перед манометром устанавливают защитный сосуд (рис. 42), заполненный инертной жидкостью. В каче-

стве такой жидкости может быть применен глицерин, вазелиновое масло, ртуть, тяжелые углеводороды и т. п. Выбор жидкости зависит от природы пара или газа, от действия которых необходимо защитить прибор. Жидкость не должна реагировать с газом, паром и его конденсатом и не растворять их в заметных количествах.

Особый случай представляют пары и жидкости, способные при охлаждении выделять твердые вещества, могущие закупорить подводящие к манометру трубки.

В этом случае необходимо вблизи точки отбора давления установить защитный сосуд, подводящую давление к сосуду труб-

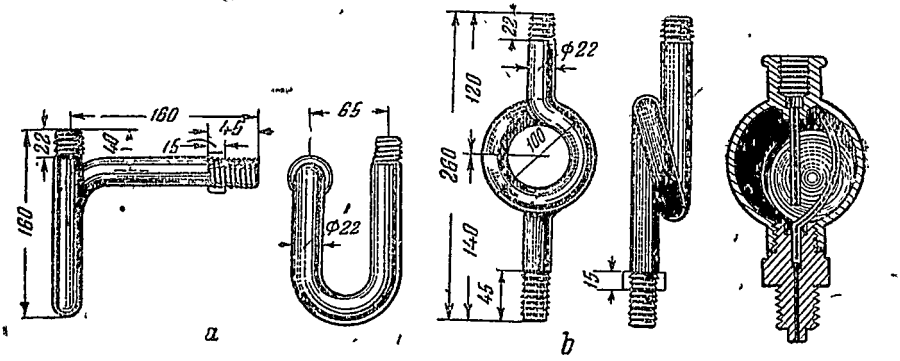


Рис. 41. *a* — сифонная U-образная трубка; *b* — сифонная кольцевая трубка.

Рис. 42. Защитный сосуд.

ку и сам защитный сосуд сделать обогреваемыми паровой рубашкой до температуры выше температуры кристаллизации, манометр же отнести от защитного сосуда несколько дальше, заполнив соединяющую трубку защитной жидкостью.

Манометр должен быть также защищен от нагревания лучеиспусканием. Для этого он должен быть либо удален от аппарата на достаточное расстояние, либо защищен экраном, поглощающим тепловые лучи.

Сотрясения и толчки снижают срок службы прибора, поэтому установка манометра на аппарате, подверженном сотрясениям, недопустима. Прибор в этом случае должен быть установлен независимо от аппарата на колонке или специальном щитке.

Второй областью применения манометров является измерение давления газов и жидкостей в трубопроводах после насосов, компрессоров и т. п. Кроме мер защиты, указанных выше, т. е. защиты от нагревания и агрессивного действия среды, здесь приходится охранять прибор от быстро меняющегося давления у поршневых машин. Быстрые колебания давления весьма сильно сокращают долговечность прибора и снижают точность показаний. Кроме того, определение давления по быстро колеблющемуся указателю, например стрелке манометра, крайне затруднительно и недостоверно.

В этих случаях перед манометром следует включать буфер, замедляющий колебания. Такой буфер выполняется либо в виде игольчатого дросселя (рис. 43), устанавливаемого перед манометром, либо в виде длинного канала малого диаметра, образованного винтовой нарезкой на конической пришлифованной пробке, вставленной в коническое гнездо трубки, включаемой перед манометром.

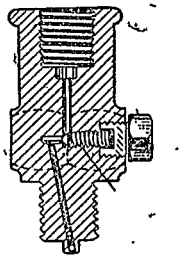


Рис. 43. Буферный дроссель.

В случае возможности возникновения резких толчков давления перед манометром устанавливают автоматическую захлопку, закрывающую линию манометра при резком толчке давления.

Манометр должен быть установлен так, чтобы на него не действовал столб жидкости в соединительных трубках, что может иметь место при измерении давлений пара или жидкости и расположении манометра значительно ниже точки забора давления. Манометр должен устанавливаться в одной горизонтальной плоскости с точкой отбора давления, а в случае невозможности этого шкала его должна быть проградуирована с учетом этого добавочного давления.

Все манометры должны быть снабжены трехходовыми кранами или вентилями с фланцем для присоединения контрольного манометра.

Для уплотнения соединений манометра следует применять кожу (до 20 *кг/см*^{2}), свинец (до 50 *кг/см*^{2}), отожженную красную медь, алюминий или фибру (до 500 *кг/см*^{2}).

Для измерения давления сжатого кислорода прокладки из органических материалов недопустимы.

Методы поверки приборов для измерения давления. Измерение давления, как и всякое измерение имеет смысл лишь в том случае, когда есть уверенность в правильности измерительного прибора или заранее известна величина его ошибок. Поэтому при измерении давлений необходимо применять приборы, дающие точные показания.

Если исключить U-образные и чашечные жидкостные манометры, которые при правильной их установке обеспечивают точность показаний в течение весьма продолжительного времени, все остальные манометры должны подвергаться периодической поверке.

Методы поверки манометров могут быть сведены к поверке нулевой точки, поверке рабочей точки и полной поверке шкалы.

Метод поверки нулевой точки сводится к наблюдению положения стрелки прибора после его отключения от давления.

Принимается, что прибор исправен, если по снятии давления стрелка становится на нулевой штрих шкалы.

Манометры, имеющие трехходовой кран, позволяют производить поверку нулевой точки весьма просто: перестановкой крана в положение, сообщающее манометр с атмосферой.

Поверку нулевой точки следует производить не реже трех раз в сутки — при приеме смены. При поверке следует строго соблюдать правило медленного и плавного включения и выключения давления, особенно в пружинных приборах.

Поверка рабочей точки прибора осуществляется присоединением к манометру во время его работы контрольного манометра и сличением показаний обоих приборов.

Контрольный манометр присоединяется к боковому фланцу трехходового крана и медленным вращением последнего оба манометра присоединяются к давлению.

Контрольным прибором для манометров, работающих на очень малых давлениях (тягомеров), служит микроманометр с переменным углом наклона.

Поверку рабочей точки следует производить, в зависимости от условий работы прибора и ухода за ним, от двух до шести раз в месяц.

Оба эти метода поверки являются скорее методами контроля состояния прибора и не дают полной характеристики степени его точности. Тем не менее применение их обязательно в производственных условиях, так как оно позволяет своевременно установить неисправность прибора и необходимость его замены и ремонта.

Полная поверка приборов производится в лаборатории. Она выполняется периодически для приборов, находящихся в эксплоатации, и обязательно после каждого ремонта прибора, независимо от характера ремонта.

Для поверки рабочего манометра применяются образцовые приборы и аппарат для создания возрастающего по величине давления.

В качестве образцовых манометров применяются ртутные U-образные или чашечные манометры для давлений до 5 *кг/см*^{2}, поршневой прибор Рухгольца для давления до 50 *кг/см*^{2} и пружинные образцовые манометры для давлений от 1,5 до 2000 *кг/см*^{2}.

Для поверки манометров по ртутному или пружинному образцовому манометру в качестве аппарата, создающего давление, применяют пресс, устройство которого схематически представлено на рис. 44. Пресс состоит из цилиндрического корпуса *1*, укрепленного на плите *2*. Корпус в верхней части имеет две бобышки *3* и *4*, служащие для присоединения образцового и поверяемого прибора. Канал бобышки *3* перекрывается игольчатым вентилем *5*, отключающим его от внутренней полости пресса. В корпус *1* ввинчена крышка *6*, составляющая одно целое с цилиндром *7*, в котором может двигаться поршень *8* с манжетным кожаным уплотнением. Передвижение поршня осуществляется вращением штока *9* с винтовой нарезкой в гайке, нарезанной в крышке *6*. Вращение штока *9* производится от руки маховичком *10*, насаженным на конец штока. Поршень скреплен со штоком подвижно, так что вращение штока не передается поршню и последний имеет только поступательное движение. Заполнение полостей

пресса производится маслом или глицерином через отверстие бобышки *4*. Перед заполнением поршень пресса передвигают в крайнее левое положение и при заполнении постепенно отводят вправо до конца хода.

Поверку выполняют следующим образом. К бобышке *3* присоединяют поверяемый манометр, а к бобышке *4* — образцовый. Вентиль *5* должен быть открыт. Вращая маховичек *10*, начинают постепенно повышать давление, наблюдая его величину по образцовому манометру. Доведя давление до желаемой величины (обычно через несколько делений шкалы так, чтобы в пределах от нуля до величины рабочего давления было проверено 3—5 точек), по образцовому прибору, снимают показание поверяемого

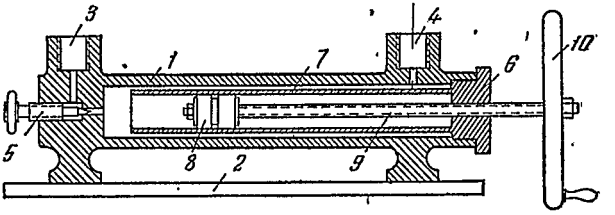


Рис. 44. Пресс для поверки манометров:

1 — цилиндрический корпус пресса; *2* — основная плита; *3* и *4* — бобышки для присоединения манометров; *5* — игольчатый вентиль; *6* — крышка; *7* — цилиндр пресса; *8* — поршень; *9* — винтовой шток; *10* — маховичек.

манометра. Показания поверяемого манометра снимают дважды — один раз без какого-либо воздействия на прибор, другой — после легкого постукивания согнутым пальцем по корпусу манометра. Обнаруживаемые при этом скачки стрелки будут указывать на наличие в механизме прибора зазоров или заеданий. Скачки стрелки при постукивании не должны выходить за пределы половины допускаемой для данного прибора погрешности. Когда поверены 3—5 точек шкалы, давление поднимается до предела шкалы, вентиль *5* закрывают и, отводя поршень вправо, снимают давление с образцового манометра. Поверяемый прибор выдерживают при предельном давлении в течение 5 мин., после чего давление в прессе поднимают до давления, показываемого поверяемым прибором, вентиль *5* открывают и продолжают поверку тем же порядком, но при понижающемся давлении.

Как повышение, так и понижение давления должно вестись плавно, без толчков. Полученные отклонения показаний манометра от показаний образцового прибора сравнивают с допускаемыми погрешностями и на основании этого сравнения устанавливают годность прибора к работе.

Поверку всей шкалы можно производить и на приборе Рухгольца, однако этого не следует делать в отношении рабочих манометров. Прибор Рухгольца является прибором высокой точно-

сти, постоянное применение которого для поверки эксплоатационных приборов нецелесообразно, так как частое его использование быстро приведет к износу колонки и поршня, т. е. к порче прибора.

Прибор Рухгольца следует применять исключительно для поверки контрольных и образцовых пружинных манометров. Рабочие же манометры следует поверять по образцовым приборам описанным выше методом.

Точность образцовых манометров, поддерживаемая периодической поверкой на приборе Рухгольца, в пять раз выше рабочих; такая точность обеспечивает качество поверки эксплоатационных приборов.

Выбор манометра. Выбор манометра того или другого вида зависит от величины измеряемого давления, требующейся степени точности измерения и общей системы контроля.

В автоматическом контроле с регистрацией и телепередачей показаний прибора наиболее пригодными видами манометров будут: для давления от 0 до 200 *мм* вод. ст. — жидкостные манометры: кольцевые весы, поплавковые профильные, колокольные и мембранные пружинные манометры; для давлений от 0 до 2000 *мм* вод. ст. — кольцевые весы, поплавковые профильные, пружинные; для давлений в пределах до 2000 *кг/см*^{2} — пружинные трубчатые манометры.

В случаях, требующих высокой точности измерений в диапазонах давлений 50—1000 *кг/см*^{2} при небольших колебаниях давления, единственным прибором, пригодным для измерений, является поршневой манометр.

Сверхвысокие давления (до 10000 *кг/см*^{2}) с достаточной точностью могут быть измерены емкостными электрическими манометрами и манометрами сопротивления.

Для измерения весьма малых абсолютных давлений порядка десятых долей миллиметра ртутного столба пригоден емкостный электрический манометр; для давлений (абсолютных) в пределах от 0 до 0,01 *мм* рт. ст. может служить термоэлектрический манометр типа Пирани.

Таким образом, наибольший участок всей шкалы давлений может быть обслужен в низкой части манометром типа кольцевых весов, являющимся наиболее удобным и точным прибором, в остальной части пружинными манометрами. Приборы этих двух типов наиболее удобны для целей автоматического контроля давлений в химических производствах.

ГЛАВА III

ИЗМЕРИТЕЛИ УРОВНЯ

14. Общие сведения

Измерения уровня жидкостей и твердых сыпучих тел принадлежат к вспомогательным контрольным операциям; тем не менее в ряде случаев они играют весьма важную роль в химических производствах. Достаточно указать на случаи измерения уровня воды в паровых котлах, уровня жидкости в перегонных кубах, выпарных аппаратах и т. п., чтобы видеть важность этого раздела контроля.

Измерение уровня жидкости применяется также для определения количества продуктов или полупродуктов, хранящихся в резервуарах и цистернах, и с целью избежания потерь продукта от переполнения расходных баков, сборников и тому подобных аппаратов.

Измерение уровня для определения количества жидкостей, хранящихся в сборниках, существенно отличается от измерения уровня с целью поддержания его постоянным.

В первом случае диапазон измерения определяется геометрическими размерами аппарата и измеритель должен определять положение уровня от дна до верхнего края резервуара или цистерны.

Измерители уровня с целью его стабилизации на нормальной высоте имеют очень узкий предел измерений, определяющийся допустимыми пределами колебания уровня, обычно составляющими $\pm$ 100 *мм*.

Это обстоятельство, естественно, отражается на методах измерения и устройстве приборов для измерения уровня и позволяет разделить их на приборы узкого диапазона измерений и приборы широкого диапазона.

Приборы узкого диапазона имеют обычно нулевую точку, соответствующую нормальной высоте уровня в середине шкалы, и деления, показывающие величину отклонения от нормальной высоты уровня, идущие в обе стороны от нуля.

Приборы широкого диапазона имеют нуль в начале шкалы и деления, идущие в одну сторону. Деления шкалы в этом случае указывают непосредственно положение уровня над дном сосуда в линейных мерах.

Часто шкала приборов широкого диапазона градуируется в объемных мерах, т. е. вместо высоты уровня жидкости над дном

сосуда указывается объем жидкости, содержащейся в сосуде при данном положении уровня.

15. Уровнемеры узкого диапазона

Водомерные стекла. Наиболее старым и простым прибором для измерения уровня является водомерное стекло. Водомерные стекла применяются в виде стеклянных трубок или плоских стекол.

Водомерное трубчатое стекло укрепляется в металлических головках к стенке сосуда так, чтобы нормальный уровень приходился на половине длины стекла. Верхняя головка тогда будет сообщать стекло с газовым или паровым пространством аппарата, а нижняя с водяным. Уровень жидкости в стекле по закону сообщающихся сосудов будет на одной высоте с уровнем жидкости в аппарате. Наблюдая за положением уровня в стекле, можно судить об изменениях уровня в аппарате.

Головки водомерных стекол снабжаются вентилями или кранами для отключения стекла от аппарата, а нижняя головка — вторым вентилем или краном, сообщающим стекло с наружным пространством для продувки каналов в головках.

В арматуру водомерных стекол, работающих под давлением, вводится предохранительное устройство (автоматические захлопки), закрывающее каналы в головках при случайной поломке стекла.

Трубчатые стекла сравнительно хрупки; при загрязнении внутренней поверхности наблюдение за положением уровня затрудняется. Поэтому трубчатые водомерные стекла в значительной мере вытесняются плоскими стеклами Клингера.

Стекло Клингера представляет собой толстую продолговатую пластинку с вышлифованными с одной стороны продольными трехгранными канавками. Стекло Клингера закрепляется в специальной металлической оправе с цилиндрическими трубчатыми хвостами, при помощи которых оно устанавливается в нормальной арматуре водомерных трубчатых стекол.

Стекло Клингера устанавливается в оправе канавками внутрь, в сторону жидкости. Особенностью его является резкое разграничение газового или парового пространства от пространства, заполненного жидкостью. Благодаря явлению полного внутреннего отражения газовое или паровое пространство кажется для глаза серебристо-белым, а жидкостное черным. Вследствие этого положение уровня в стекле Клингера рисуется весьма четко и поддается наблюдению на расстоянии.

Стекла Клингера изготовляются и применяются для работы под давлением до 60 *кг/см*^{2}.

Сниженные указатели уровня. При высоко расположенных сосудах (барабаны водотрубных котлов) установка обычных водомерных стекол не достигает цели, так как наблюдение за положением уровня с рабочего места становится невозможным. В этих случаях используют так называемые сниженные указатели уровня.

Принципиальная схема сниженного указателя уровня представлена на рис. 45. Сниженный указатель уровня состоит из двух вертикальных трубок *1* и *2*, присоединенных к водяному и паровому пространству котла. Трубка *2*, соединенная с паровым пространством, снабжена в верхней части сосудом *3*, являющимся сосудом постоянного уровня. Обе трубки заполнены водой и присоединены к ртутному дифференциальному манометру *4*.

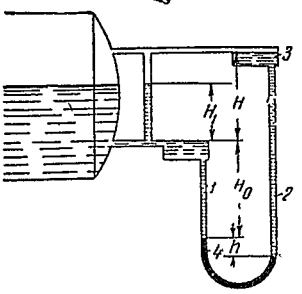


Рис. 45. Сниженный указатель уровня:
1 и *2* — вертикальные трубки; *3* — сосуд постоянного уровня; *4* — дифференциальный манометр.

Пользуясь обозначениями, указанными на рис. 45, можно написать условия равновесия для сечения *a—b*:

$$(H + H_0 + h)\,\gamma = (H_1 + H_0)\,\gamma + h\gamma_1, \qquad (54)$$

где γ — плотность воды в трубках;
γ_1 — плотность ртути.
Отсюда

$$(H + H_1)\,\gamma = h\,(\gamma_1 - \gamma); \qquad (55)$$

$$h = (H - H_1)\,\frac{\gamma}{\gamma_1 - \gamma}. \qquad (56)$$

Вместо U-образного ртутного дифференциального манометра может быть применен любой другой тип.

На рис. 46 изображен сниженный указатель уровня с пружинным дифференциальным манометром на паровом котле. Недостатком этой схемы является уменьшение делений шкалы, что делает затруднительным измерение небольших колебаний уровня.

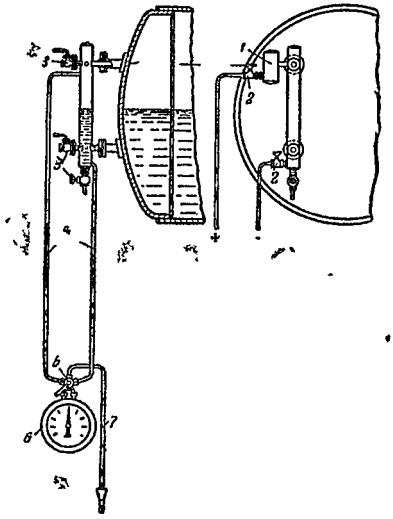


Рис. 46. Сниженный указатель уровня с пружинным манометром:
1 — сосуд постоянного уровня; *2* — запорные вентили; *3* — продувные краны; *4* — снижающие трубы; *5* — управляющий кран; *6* — манометр; *7* — сливная труба.

Сниженный обращенный указатель уровня. Более удобен и чувствителен тип сниженного указателя уровня, называемый обращенным указателем уровня, схема которого представлена на рис. 47. Важным преимуществом этого указателя является то, что он у рабочего места воспроиз-

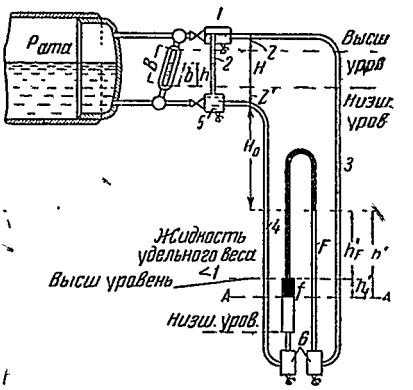


Рис. 47. Сниженный обращенный указатель уровня:
1 — конденсационный сосуд; *2* — переливная трубка; *3* и *4* — снижающие трубки; *5* — грязевик; *6* — дифференциальный обращенный манометр.

водит колебания уровня в натуральную величину. Рабочей жидкостью в этом указателе служит раствор масла в смеси керосина с бензином, имеющий плотность 0,8 *г/см*³. Поскольку плотность рабочей жидкости меньше плотности воды, дифференциальный манометр опрокинут против своего обычного положения.

Паровое пространство котла соединено с конденсационным сосудом *1*. Излишек конденсата стекает по переливной трубке *2* в сосуд *5*, служащий грязеуловителем. В трубке *3*, соединенной с конденсационным сосудом, имеется постоянное гидростатическое давление; в трубке же *4*, соединенной через сосуд *5* с водяным пространством, гидростатическое давление меняется сообразно изменению уровня воды в котле.

Переменная разность давлений измеряется обращенным дифференциальным манометром *6*, одно из колен которого является указателем уровня. Повышение уровня воды в котле увеличивает давление в трубке *4*, что вызывает повышение уровня раздела воды и рабочей жидкости в стекле прибора *А*.

Таким образом, уровню воды в котле соответствует уровень воды в стекле прибора, а пару — подкрашенная рабочая жидкость.

Для совпадения величин перемещения уровня в котле и перемещения уровня в стекле прибора при определенном давлении пара необходимы определенные конструктивные соотношения размеров трубки *3* и указателя прибора и определенный удельный вес рабочей жидкости.

Обозначив:

$\gamma_п$ — удельный вес пара в котле при рабочем давлении в *г/см*³;

$\gamma_к$ — удельный вес воды в котле при том же давлении и температуре в *г/см*³;

$\gamma_в$ — удельный вес воды в трубках прибора при температуре 40° в *г/см*³;

$\gamma_ж$ — удельный вес рабочей жидкости при 40° в *г/см*³;

h — высоту столба воды в водомерном стекле котла в *см*;

h_1 — высоту столба воды в указателе прибора в *см*;

f — площадь сечения стекла указателя прибора в *см*²;

F — площадь сечения трубки дифференциального манометра в *см*²;

H — предельное колебание уровня;

z — расстояние зеркала жидкости в конденсационном сосуде от линии наивысшего уровня;

z — расстояние от оси нижней соединительной трубки до линии низшего уровня,

будем иметь следующее соотношение:

$$h_1 = \frac{(z+H+z')\,\gamma_в - (z+H)\,\gamma_п - z'\gamma_к}{\gamma_в - \gamma_ж} - \frac{\gamma_к - \gamma_п}{\gamma_в - \gamma_ж}\,h, \qquad (57)$$

при вертикально расположенном указателе уровня:

$$\gamma_ж = \gamma_в \frac{\gamma_к - \gamma_п}{1 - \frac{f}{F}}. \qquad (58)$$

Величина $\frac{f}{F}$ в принятой конструкции равна 3,0. Для наклонно установленного водомерного стекла котла перемещение уровня воды в стекле:

$$b = \frac{B}{H}h. \qquad (59)$$

Чтобы показание уровня в сниженном указателе было равно перемещению его в наклонном стекле, надо, чтобы:

$$\gamma'_ж = \gamma_в - \frac{H}{B}(\gamma_в - \gamma_ж). \qquad (60)$$

При значительных изменениях давления пара в котле прибор будет работать с определенной погрешностью, величина которой, однако, не велика.

При падении давления пара с 32 до 22 *кг/см²* ошибка не будет превышать 4,5%, при обычных же колебаниях давления в пределах 30—34 *кг/см²* погрешность прибора не превышает 1—1,5%.

Указатель прибора состоит из двух параллельных стекол Клингера, установленных в металлической рамке на прокладках. При освещении указателя сзади раздельная черта между водой и подкрашенной жидкостью отчетливо видна. Длина видимой части жидкостного столба 310 *мм*. На рамке указателя уровня укреплены два указателя наивысшего и наинизшего уровня на расстоянии 200 *мм* один от другого.

Обращенный диференциальный манометр выполнен из стальной цельнотянутой трубы диаметром 14/10 *мм*. В верхней точке колена имеется трехходовой кран для наполнения диференциального манометра рабочей жидкостью и регулировки уровня рабочей смеси путем выпуска части ее наружу.

Для выпуска из прибора скапливающейся грязи, в нижней его части предусмотрены два отстойника.

Пружинный сниженный указатель уровня. К сниженным указателям уровня, кроме жидкостных диференциальных манометров, можно отнести и другие их типы. Одним из удачных видов диференциальных манометров для сниженного указателя уровня является мембранный манометр Эккардта (рис. 48).

Манометр состоит из плоской металлической мембраны *1*, зажатой краями между фланцами корпуса *2* прибора. В центре мембраны с обеих сторон припаяны волнистые трубки (сильфоны) *3*, вторые концы которых герметически закреплены в корпусе. К верхней поверхности мембраны прикреплен стержень *4*, передающий колебания мембраны указательной стрелке или индивидуальному передатчику. Наличие сильфонов исключает необходимость сальников и таким образом устраняет источник ошибок от неопределенной величины трения в сальнике.

Шкала прибора градуирована в *см* вод. ст. с нулем посредине шкалы.

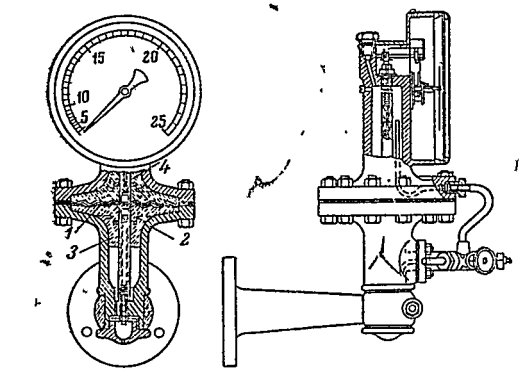


Рис. 48. Мембранный диференциальный манометр Эккардта:
1 — мембрана; *2* — корпус прибора; *3* — уплотнительные сильфоны; *4* — передаточный стержень.

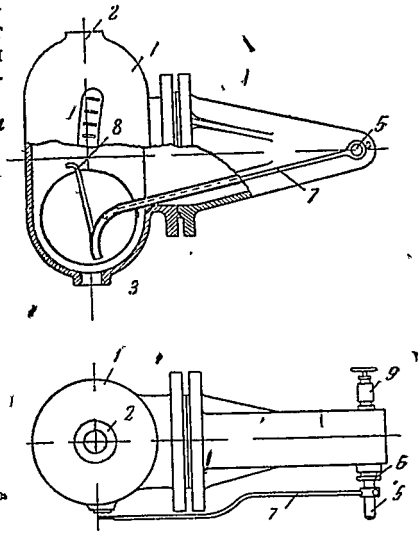


Рис. 49. Поплавковый указатель уровня Арматреста:
1 — корпус прибора; *2* и *3* — бобышки для присоединения соединительных трубок; *4* — поплавок; *5* — ось рычага поплавка; *6* — сальник; *7* — указательная стрелка; *8* — разгрузочная трубочка; *9* — вентиль.

Поплавковые измерители уровня. Другим видом измерителей уровня узкого диапазона являются поплавковые измерите-

ли уровня. Они выполняются в различных конструктивных модификациях, но принципиально тождественны по идее.

На рис. 49 изображен поплавковый измеритель уровня в исполнении Арматреста. Указатель уровня состоит из чугунного или стального корпуса *1*, соединяющегося трубками, ввертываемыми в бобышки *2* и *3*, с аппаратом. Внутри корпуса помещен шарообразный поплавок *4*, укрепленный на рычаге, вращающемся на оси *5*, один конец которой через сальник *6* выходит из корпуса наружу.

На этом конце оси насажена стрелка *7*, передвигающаяся по шкале, укрепленной на корпусе прибора.

Для работы при высоких давлениях внутренняя полость тонкостенного поплавка соединена с окружающей средой трубочкой малого диаметра *8*, доходящей до дна поплавка. Рычаг, на котором сидит поплавок, также выполнен трубчатым и канал его соединен с каналом одной половины оси. В корпусе прибора укреплен вентиль *9*, позволяющий при накоплении внутри поплавка жидкости выпустить ее наружу.

Для неагрессивных жидкостей в пределах температур до 260° применяются медные или алюминиевые поплавки. Для более высоких температур до 400° — стальные. Для агрессивных жидкостей поплавок должен быть сделан из соответствующего металла или сплава, устойчивого против коррозии. Корпуса прибора для температур до 260° изготовляются из чугуна, а для более высоких из стали.

Поплавковый указатель может быть снабжен индукционным передатчиком.

16. Уровнемеры широкого диапазона

Водоуказательные стекла. Для измерения уровня жидкости в сборниках, баках, хранилищах или цистернах, где колебания уровня жидкости определяются полной высотой сосуда, могут применяться различные приборы.

Простейшими приборами и в этом случае являются водомерные стекла трубчатые или плоские.

Из конструктивных и эксплоатационных соображений длину трубчатого стекла не следует брать выше 1,5 *м*. В том случае, если высота сосуда превышает 1,5 *м*, устанавливают по высоте несколько водомерных стекол в шахматном порядке с взаимным перекрытием, т. е. так, чтобы уровень жидкости был всегда виден в каком-либо стекле. Точно так же поступают, применяя плоские стекла Клингера, тем более, что предельная длина стекла Клингера не превышает 350 *мм*.

Недостатки водоуказательных стекол, как-то: хрупкость, недостаточная наглядность показаний и невозможность передачи показаний на расстояние, заставляют применять иные приборы для измерения уровня.

Поплавковые измерители уровня широкого диапазона. В качестве прибора широкого диапазона измерений наиболее примитив-

ной формой поплавкового измерителя уровня будет поплавок, подвешенный на тросе или гибкой металлической ленте, снабженной противовесом, служащим одновременно указателем положения поплавка на вертикальной шкале. Этот тип измерителя уровня дает весьма грубые показания, содержа в себе источник погрешностей, заключающийся в изменении глубины погружения поплавка по мере его подъема, так как к весу противовеса присоединяется вес все большей длины троса или ленты, и имеет неудобную, слишком громоздкую шкалу (длина ее равна высоте сосуда и деления идут в обратном направлении).

Измеритель уровня с градуированной лентой. Несколько более удобным прибором является измеритель уровня с градуированной лентой (рис. 50).

Этот прибор состоит из большого тяжелого поплавка *1*, подвешенного на стальной градуированной ленте. Лента проходит через ролики гидравлического затвора *2* и затем движется в системе труб.

Лента нагружена противовесом *3*. В одной из труб устроено стеклянное окошко *4* с неподвижным указателем, через которое наблюдается и отсчитывается положение уровня по делениям, нанесенным на ленте.

Для устранения ошибок, вследствие раскачивания поплавка, поплавок направляется двумя струнами *5*, натягиваемыми грузом *6*, обеспечивающим одновременно строго вертикальное положение струн.

Ошибка от изменения глубины погружения поплавка, вследствие изменения веса второй ветви ленты, здесь уменьшена тем, что вес ленты весьма мал по сравнению с весом поплавка и поэтому ничтожно влияет на его положение в жидкости.

Поплавковые измерители уровня позволяют достаточно легко осуществить дистанционную передачу показаний.

Из многочисленных систем телепередачи, применяющихся к поплавковым измерителям уровня, следует остановиться на двух: импульсной и сельсинной.

Схема импульсной телепередачи представлена на рис. 51. Ось импульсного колеса *1* связана с осью одного из роликов поплавкового устройства. Импульсное колесо снабжено по окружности рядом зубцов, отстоящих друг от друга на определенном расстоянии, равном желаемой единице измерения (например, 1 *см*). Над зубцами колеса расположен маятник *2*, несущий на себе ртутный выключатель (меркоид). Язычек маятника входит в промежуток между зубцами колеса.

При вращении колеса в ту или другую сторону прохождение каждого зубца вызовет отклонение маятника, а следовательно, кратковременное замыкание цепи *I* или *II* в зависимости от направления вращения импульсного колеса, т. е. от направления движения поплавка вверх или вниз. Электрические импульсы, возникающие в цепи *I* или *II*, воспринимаются электромагнитами M_1 или M_2, действующими на дифференциальный счетчик *3*. Прием импульсов электромагнитом M_1, соответствующих подъему поплавка,

увеличивает показания счетчика. Импульсы, принимаемые электромагнитом M_2, при опускании поплавка, уменьшают показания счетчика. При этом каждый импульс плюс или минус изменяет показания счетчика на одну единицу. Цифра, стоящая на счетчике, в

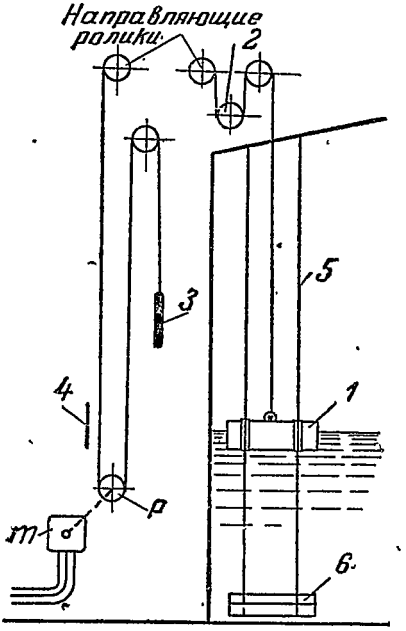


Рис. 50 Уровнемер с градуированной лентой:
1 — поплавок; *2* — гидравлический затвор; *3* — противовес; *4* — смотровое окошко; *5* — направляющие струны; *6* — натяжной груз; *7* — ролик телепередатчика.

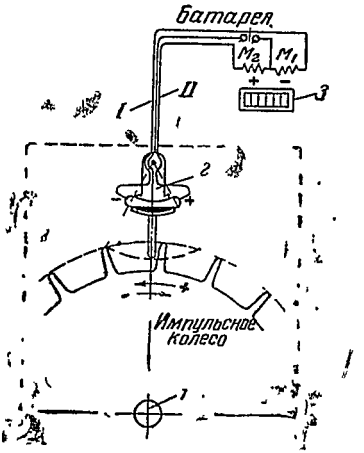


Рис. 51. Схема импульсной телепередачи уровнемера:
1 — ось импульсного колеса; *2* — маятник; *I* и *II* — электрические цепи; M_1 и M_2 — электромагниты; *3* — диференциальный счетчик.

каждый данный момент указывает, таким образом, высоту уровня жидкости в резервуаре.

Сельсинный передатчик (рис. 52) представляет собой тип индукционного мотора. Статор выполнен в виде железного ярма с двумя полюсами и двумя катушками возбуждения, последовательно включенными в цепь переменного тока. Ротор трехфазного типа с обмоткой, соединенной звездой. Обмотка ротора имеет выводы от каждой фазы к трем контактным кольцам, насаженным на ось ротора. Ток снимается с колец неподвижными щетками. Два таких мотора образуют сельсинный передатчик. Обмотки роторов соединены друг с другом тремя проводами, а статоры включены в одну и ту же сеть переменного тока.

Переменный магнитный поток статора индуцирует в обмотках ротора электродвижущие силы, величины которых зависят от положения каждой фазовой обмотки относительно магнитного потока. Если положение обоих роторов по отношению к магнитному потоку статоров одинаково, то электродвижущие силы обмоток взаимно равны и, будучи направленными друг против друга, уравновесятся; в соединительных проводах тока не будет. Но как только ротор одного из сельсинов повернется на некоторый угол, электродвижу-

щие силы фаз приемника и передатчика станут не равными, в соединительных проводах появится ток, создающий дополнительный момент вращения. Тот из роторов, который не удерживается внешней силой, т. е. ротор приемника, начнет поворачиваться до уравнивания электродвижущих сил, т. е. до положения, аналогичного положению ротора передатчика. Таким образом, ротор приемника будет точно следовать движению ротора передатчика, причем передача происходит в пределах любого угла поворота, т. е. в пределах любого числа полных оборотов роторов.

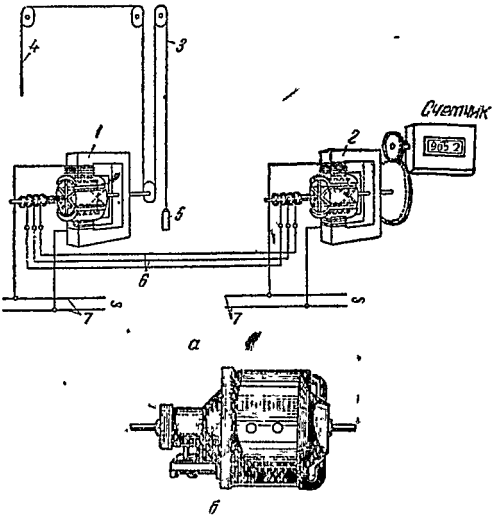


Рис. 52. Схема сельсинного телепередатчика:

1 — передатчик; *2* — приемник; *3* — металлическая лента к поплавку; *5* — противовес; *6* — соединительные провода роторов сельсинов; *7* — линии питания статоров переменным током.

В применении к измерению уровня ось сельсинного передатчика соединяется с осью одного из роликов поплавкового устройства, а ось приемника со счетчиком реверсивного действия, указывающего непосредственно высоту уровня.

Пневматические измерители уровня. Измерение уровня жидкости постоянной плотности можно производить на основании гидростатического закона, по которому высота столба жидкости выражается величиной давления, оказываемого этим столбом.

На этом принципе построены пневматические измерители уровня.

Прибор (рис. 53) состоит из колокола *1*, помещенного на дне сосуда, и манометра *2*, соединенного с полостью колокола тонкой трубкой *3*. Жидкость, наполняющая сосуд, по мере повышения уровня будет сжимать воздух, заключающийся внутри колокола, причем давление воздуха будет пропорционально высоте столба жидкости в сосуде, т. е. пропорционально положению уровня. Это позволяет градуировать шкалу манометра в линейных мерах высоты уровня.

Открытый снизу колокол неудобен тем, что воздух, заключенный под колоколом, непосредственно соприкасаясь с поверхностью жидкости, постепенно в ней растворяется, уровень жидкости под колоколом вследствие этого повышается и измерение становится неточным.

Нежелательное явление растворения воздуха устраняют одним из следующих способов.

а) Применение колоколов, закрытых снизу тонкой резиновой мембраной. Колокол выполняется из двух частей, между фланцами которых зажимается гибкая тонкая резиновая мембрана. Применение мембраны несколько снижает чувствительность прибора и возможно лишь для измерения уровня жидкостей, не действующих

химически на резину. Поэтому для измерения уровня азотной и серной кислот и многих органических растворителей резиновая мембрана не применима.

б) Периодическое подкачивание воздуха в колокол. В этом случае перед манометром, измеряющим давление, устанавливают трехходовой кран *4* (см. рис. 53), через боковой отросток которого, при соответствующей его установке, время от времени подкачивают в колокол воздух ручным насосом типа велосипедного.

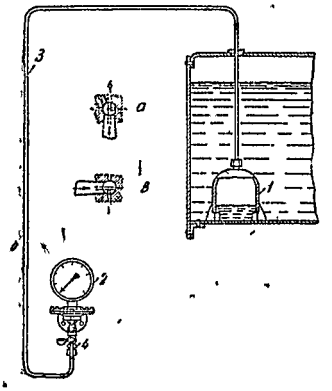


Рис. 53. Пневматический уровнемер:
1 — колокол; *2*—манометр; *3* — соединительная трубка; *4* — трехходовой кран.

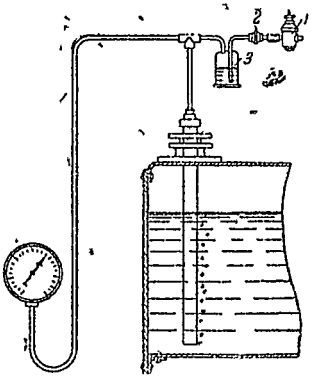


Рис. 54. Пневматический уровнемер с продуванием воздуха:
1 — редукционный клапан; *2*—диафрагма; *3* — гидравлический затвор.

Этот способ наиболее прост, но требует ручного обслуживания и точность измерений зависит от регулярности подкачки воздуха.

в) Непрерывное продувание воздуха через систему. В этом случае в систему (рис. 54) через редукционный клапан *1* и диафрагму с малым отверстием *2* подается воздух из сети сжатого воздуха. За диафрагмой целесообразно установить стеклянный гидравлический затвор *3* для контроля за скоростью подачи воздуха в систему. Редукционный вентиль регулируется так, чтобы через гидравлический затвор воздух проходил отдельными пузырьками, поддающимися подсчету.

Колокол может быть заменен в этом случае, как изображено на рис. 54, отрезком трубы диаметром 30—50 *мм*.

17. Измерители уровня твердых сыпучих тел

С измерением уровня твердых сыпучих тел приходится встречаться при контроле состояния расходных бункеров и контроле известковообжигательных печей, газогенераторов и тому подобных аппаратов.

Контроль в этих случаях может иметь целью установление и сигнализацию предельных значений уровня (наивысший, наинiз-

ший, нормальный) или определение численного значения положения уровня. В связи с этим применяются предельные сигнализаторы уровня и измерители уровня.

Сигнализатор уровня. Один из видов предельных сигнализаторов уровня для указания уровня в бункерах изображен на рис. 55. Сигнализатор состоит из чугунного колокола *1*, подвешенного на кронштейне *2* к стенке бункера. Внутри колокола на цепочке *3* подвешена закрытая чугунная груша *4* со встроенным в ней ртутным контактом (меркоидом). Когда уровень сыпучего материала не касается груши, она висит вертикально и меркоид разомкнут. При повышении уровня материал отклоняет грушу от вертикального положения и меркоид замыкает сигнальную цепь.

Для сигнализации трех положений уровня устанавливаются три сигнализатора на соответствующих высотах.

Уровнемер сыпучего материала, дающий численное значение положения уровня, состоит (рис. 56) из щупа *1*, представляющего собой штангу, на нижнем конце которой насажен тяжелый чугунный диск *2*. Верхний конец

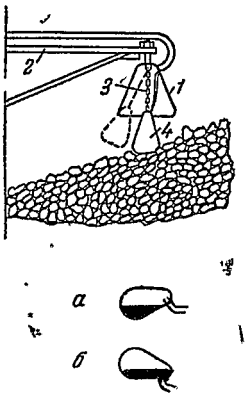


Рис. 55. Сигнализатор уровня сыпучего материала:

1—колокол; *2*—кронштейн; *3* — цепочка груши; *4* — груша, *а*—разомкнутый меркоид; *б* — замкнутый меркоид.

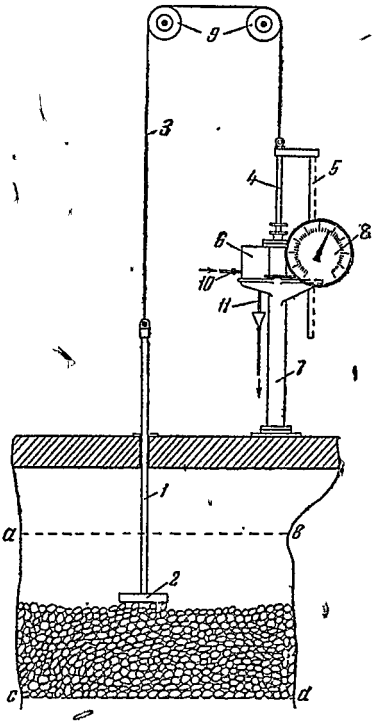


Рис. 56. Уровнемер сыпучего материала:

1 — щуп; *2* — диск щупа; *3*— стальной трос; *4*—шток поршня; *5* — зубчатая рейка; *6* — золотниковое реле; *7*—гидравлический цилиндр; *8* — указательный механизм; *9* — блоки троса; *10* — трубопровод подачи жидкости под давлением; *11* — сливная труба.

штанги щупа соединен стальным тросом или цепью *3*, перекинутой через блочки *9*, с штоком *4* поршня гидравлического цилиндра *7*. Со штоком поршня связана зубчатая рейка *5*, передающая движение штока поршня указательному механизму *8*. Золотниковое устройство *6*, действующее от моторного реле времени, периодически сообщает верхнюю полость цилиндра *7* с

трубопроводом *10*, подающим воду под давлением или сжатый воздух в цилиндр, или с выхлопной трубой *11*.

Подъем штанги щупа *1* вверх определяется длиной хода поршня; движение щупа под действием собственного веса вниз определяется положением урсвня материала в данный момент. Длина хода штанги при ее опускании является мерой положения уровня.

Таким образом, измеритель уровня определяет его положение в пределах длины хода поршня гидравлического цилиндра, т. е. между горизонтами *a—b* и *c—d*. Измеритель устанавливается так, чтобы нормальное положение уровня находилось на половине высоты между горизонтами *ab* и *cd*, сообраз-

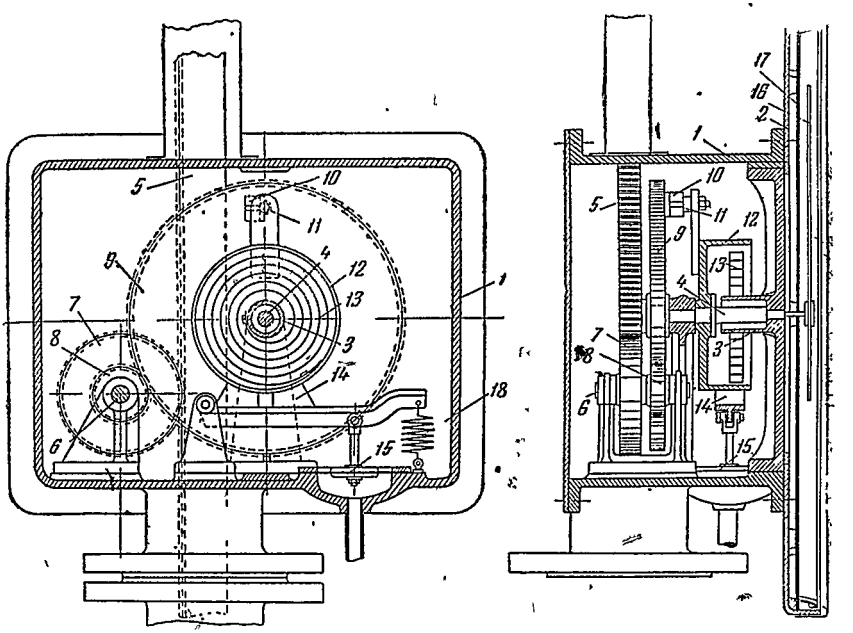


Рис. 57. Механизм указателя уровнемера сыпучего материала:

1 — корпус прибора; *2* — корпус циферблата; *4* — ось колеса *9*; *5* — зубчатая рейка; *6* — ось шестерней *7* и *8*; *7* и *8* — шестерни; *9* — зубчатое колесо; *10* — кулак; *11* — палец барабана; *12* — барабан; *13* — спиральная пружина; *14* — тормоз барабана; *15* — мембрана тормоза; *16* — указательная стрелка; *17* — шкала; *18* — пружина тормоза.

но чему на указательном циферблате нуль шкалы помещен посредине и деления идут в обе стороны от нуля, отмечая величину понижения или повышения уровня от нормальной высоты.

Механизм отсчета положения уровня изображен полусхематично на рис. 57. Зубчатая рейка *5*, движущаяся вместе со штоком гидравлического цилиндра, сцепляется с шестерней *7*, вращающейся вокруг оси *6*. На оси *6* сидит также шестерня *8*, вращающаяся вместе с шестерней *7*. Шестерня *8* сцеплена с зубчатым колесом *9*, свободно вращающимся на оси *4*. Зубчатая передача от рейки *5* к колесу *9* рассчитана так, что полный ход поршня гидравлического цилиндра вызывает поворот колеса *9* на 300°.

На боковой поверхности колеса *9* укреплен радиальный выступ *10*, упирающийся в палец *11* барабана *12*, жестко закрепленного на оси *4* и вращающегося вместе с нею. Барабан *12* под действием спиральной пружины *13* стремится вращаться против часовой стрелки. Пружина *13* закреплена одним концом к внутренней поверхности стенки барабана, а другим к неподвижной

трубке *3*. Барабан *12* удерживается неподвижным колодочным тормозом *14*, управляемым мембраной *15*. На оси барабана закреплена указательная стрелка *16*, движущаяся по шкале *17*. Во время хода поршня вниз (подъем щупа) зубчатое колесо *9* поворачивается против часовой стрелки, выступ *10* отходит от пальца *11*, но барабан *12* остается в покое, удерживаемый тормозом *14*, так как на мембрану *15* снизу действует давление жидкости, поступающей в цилиндр.

По достижении поршнем крайнего нижнего положения через установленный промежуток времени реле переставит золотник и щуп начнет опускаться, увлекая поршень цилиндра вверх.

Жидкость выходит из цилиндра в выхлопную трубу через игольчатый регулируемый дроссель, поддерживающий в цилиндре некоторое избыточное давление, достаточное для действия тормоза *14*. Шестерни *7* и *8* и зубчатое колесо *9* вращаются при этом в обратную сторону. Выступ *10* приближается к пальцу *11*. Когда диск щупа достигнет поверхности материала, его движение прекратится, давление в цилиндре упадет до нуля, пружина *18* оттормозит барабан и последний под действием пружины *13* начнет вращаться против часовой стрелки, пока палец *11* не упрется в выступ *10*. Так как положение выступа *10* определяется положением щупа или, что то же, положением уровня материала, то поворот барабана *12* и стрелки *16* также будет соответствовать положению уровня материала. Если при вторичном измерении уровень материала понизится, то колесо *9* повернется на больший угол и выступ *10* встретится с пальцем *11* ранее конца движения щупа вниз. В этом случае барабан *12* будет повернут на некоторый угол по часовой стрелке, так как действующий на рейку вес щупа преодолеет сопротивление тормоза. Указательная стрелка и в этом случае отметит действительное положение уровня.

Весь механизм заключен в литой алюминиевый корпус *1*, к которому прикреплен корпус *2* циферблата.

ГЛАВА IV

ВЕСОВЫЕ И ОБЪЕМНЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ КОЛИЧЕСТВА И РАСХОДА МАТЕРИАЛОВ

18. Общие сведения

Весовое или объемное измерение количества и расхода веществ, участвующих в технологических процессах химических производств, играет очень важную роль не только как средство контроля результатов производственного процесса, но и как один из основных факторов управления ходом производства.

Простейший вид измерения количества — измерение порционное, когда все количество вещества проходит измерение отдельными определенными частями (порциями) и о всем измеренном количестве судят по сумме отдельных порций.

Например, в газогенератор подается кокс ручными вагонетками, причем каждая вагонетка взвешивается на весах. Весовое количество кокса, загруженное в генератор за определенный период времени (смену, сутки), будет равно сумме весов всех взвешенных вагонеток.

Порционирующие измерители широко применяются для измерения количества вещества в любом из трех агрегатных состояний, несмотря на некоторые их недостатки с точки зрения непрерывного химического процесса.

Другой вид измерения — измерение в непрерывном потоке, наиболее соответствующее непрерывности большинства химических процессов, применяется не менее часто, и во многих случаях вытесняет порционное измерение для жидкостей и газов. Измерение в непрерывном потоке для твердых сыпучих тел не нашло еще удовлетворительного конструктивного решения, несмотря на систематическую работу в этом направлении. Немногочисленные измерители потока твердого сыпучего материала отличаются малой точностью измерений, сложностью конструкции и недостаточной надежностью работы.

Приборы, измеряющие количество, часто называемые *счетчиками*, показывают суммарный вес или объем материала, прошедшего через прибор от начала измерения, так что количество, прошедшее за известный промежуток времени, определяется как разность двух показаний счетчика — в начале и конце контрольного периода.

Приборы, измеряющие расход, называемые *расходомерами*, указывают величину мгновенного расхода в каждый данный

момент. Показания выражены в единицах расхода, т. е. в *кг/сек*, *т/час* и т. п.

Для определения количества, прошедшего за определенный промежуток времени, расходомеры снабжаются особыми приспособлениями — интеграторами, суммирующими мгновенные расходы.

Основное деление приборов этого класса на группы проведено по признаку агрегатного состояния вещества, а внутри групп по способу измерения.

В химической практике приходится измерять количество (массу) твердых сыпучих материалов, начиная от крупнокусковых материалов размерами кусков 5—15 *см* (кокс для газогенераторов, известняк для известковообжигательных печей и т. д.) и кончая тонкодисперсными порошками (кальцинированная сода, красильные пигменты и т. п.).

Основным методом измерения для твердых материалов является весовой; объемный метод пригоден лишь для тонкодисперсных порошков однородного гранулометрического состава. Измерение количества и расхода жидкостей в химических производствах занимает значительно большее место, чем измерение количества твердых материалов. Физические свойства жидкостей облегчают задачу измерения. Легкоподвижность, способность заполнять вместилища любой формы, практическая несжимаемость, постоянство объемного веса и неразрывность потока позволяют для определения количеств жидкости применять с одинаковым успехом весовые, объемные и скоростные методы. Измерение количества и расхода газа занимает в химических производствах не менее важное место, чем измерение количества и расхода жидкостей. Для измерения количеств газа применяются объемный и скоростной методы измерений.

19. Измерители количества твердых сыпучих материалов

Весы. Основным прибором для измерения количества твердых сыпучих тел являются весы.

Весы представляют собой прибор для определения массы тела либо путем сравнения ее с известной эталонной массой грузов (гирь), либо измерением силы притяжения данного тела к земле (веса) по вызываемой этой силой деформации упругого тела.

В зависимости от этого различаются весы рычажные и пружинные (динамометры). Наибольшее применение в промышленности имеют рычажные весы.

Весы в качестве измерительного прибора должны обладать устойчивостью, т. е. свойством возвращаться после нескольких колебаний в состояние равновесия по прекращении действия возмущающей силы; чувствительностью, т. е. способностью заметно отклоняться под действием достаточно малого груза; верностью, под которой понимается определенная допускаемая величина погрешности, которую весы не должны превышать, неизменяемостью показаний, заключающейся в совпадении

результатов, в пределах допускаемой погрешности, повторных взвешиваний одного и того же груза, весопропускной способностью, т. е. способностью выносить достаточное количество взвешиваний в единицу времени при сохранении верности и неизменяемости показаний, и прочностью, т. е. способностью сохранять остальные свойства в течение продолжительного времени.

Рычажные (коромысловые) весы в общем состоят из рычага первого рода (рис. 58), имеющего точку опоры O. К концам рычага подвешены платформы (чашки) A и B — одна на расстоянии l от точки опоры для помещения взвешиваемого тела Q, а другая на расстоянии L от точки опоры для гирь P.

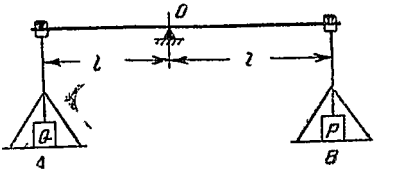


Рис. 58. Схема рычажных весов: O — опора рычага; A и B—чашки весов.

Условием равновесия весов является равенство моментов относительно точки опоры:

$$Ql = PL \qquad (61)$$

или

$$Q = \frac{L}{l} P. \qquad (62)$$

Таким образом, равновесие весов может быть достигнуто изменением первого или второго множителя правой части уравнения (62).

Чаще всего отношение $\frac{L}{l}$ сохраняется постоянным и взешивание производится изменением веса гирь P. При равенстве $L=l$ весы называются равноплечими. Если $L \neq l$, весы будут неравноплечими. В неравноплечих весах отношение плечей $\frac{L}{l}$ делают равным 10, 50, 100, 200 и т. д.

Соответственно различают весы десятичные, пятидесятичные, сотенные, двухсотенные и т. д.

Весы с постоянным P и переменным отношением $\frac{L}{l}$ называются безменами.

Обычные весы, у которых весь процесс взвешивания производится вручную, мало пригодны для современной промышленной техники: отсутствие регистрации показаний, зависимость результатов взвешивания от индивидуальных качеств весовщика, малая скорость работы — все эти недостатки вытесняют ручное взвешивание, заставляя переходить на полуавтоматические и автоматические системы.

Автоматические весы могут быть двух видов: порционные и транспортерные.

Порционные весы автоматически отсекают определенные порции взвешиваемого материала, поступающего из питательного бункера, и после взвешивания выбрасывают взвешенную порцию в приемный бункер. Счетчик весов суммирует вес материала, прошедшего через весы. Автоматические порционные весы для твердых сыпучих материалов подразделяются на весы для вагонеток, весы с опрокидывающимся ковшом и весы с открывающимся дном ковша.

Весы непрерывного взвешивания, или транспортерные весы, отличаются тем, что материал идет непрерывно через них на ленточном или ковшевом транспортере, причем весы регистрируют суммарный вес прошедшего через них материала.

Порционные весы любой конструкции состоят из станины, на которой монтируются все механизмы весов, весового механизма, впускного механизма, выпускного механизма, регулятора, обеспечивающего точность взвешивания и плавность хода весового механизма, счетчика, регистрирующего вес материала, прошедшего через весы, и кожуха, защищающего механизм весов от загрязнения, порчи и устраняющего запыление воздуха при взвешивании сыпучего материала.

Автоматические ковшевые весы типа Либра завода «Автомат». Принцип устройства автоматических весов с опрокидывающимся ковшом, схематически изображенных на рис. 59, состоит в следующем. К равноплечевому коромыслу *1* подвешен ковш *2* и груз *3*. Форма ковша выбрана такой, что при пустом ковше центр тяжести его *S* находится с правой стороны точки подвеса, вследствие чего ковш стремится вращаться вокруг точки подвеса по часовой стрелке, чему препятствует упор *4*. При наполненном ковше его центр тяжести перемещается в положение S_1, влево от точки подвеса, и ковш опрокидывается в положение, показанное на рисунке пунктиром. Фартук *5*, прикрывающий отверстие в передней стенке ковша, открывается под действием собственного веса и давления материала, содержащегося в ковше, и содержимое ковша высыпается из него. По опорожнении ковш возвращается в первоначальное положение, течка *6*, по которой подается материал, открывается и начинается новое наполнение ковша.

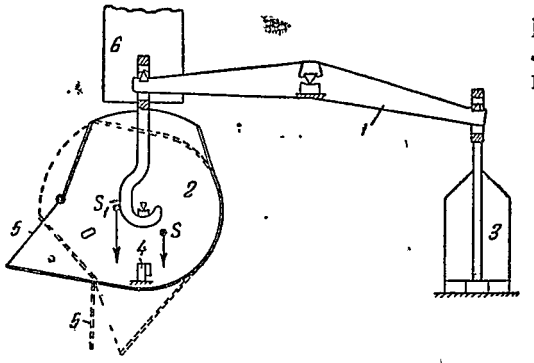


Рис. 59. Схема ковшевых автоматических весов:
1 — коромысло весов; *2* — ковш; *3* — груз; *4* — упор ковша; *5* — фартук; *6* — течка для подачи материала.

На рис. 60 представлена конструкция весов завода «Автомат» для сыпучего кускового материала. Механизм весов

смонтирован на станине, состоящей из двух боковых рам *1*, скрепленных внизу распорными болтами *2*, а вверху рамой питательной воронки *19*. На прилитые консоли станины призмами *4* опирается двойное коромысло *3*. На концевых призмах коромысла *3* с одной стороны подвешен гиредержатель *6*, а с другой стороны

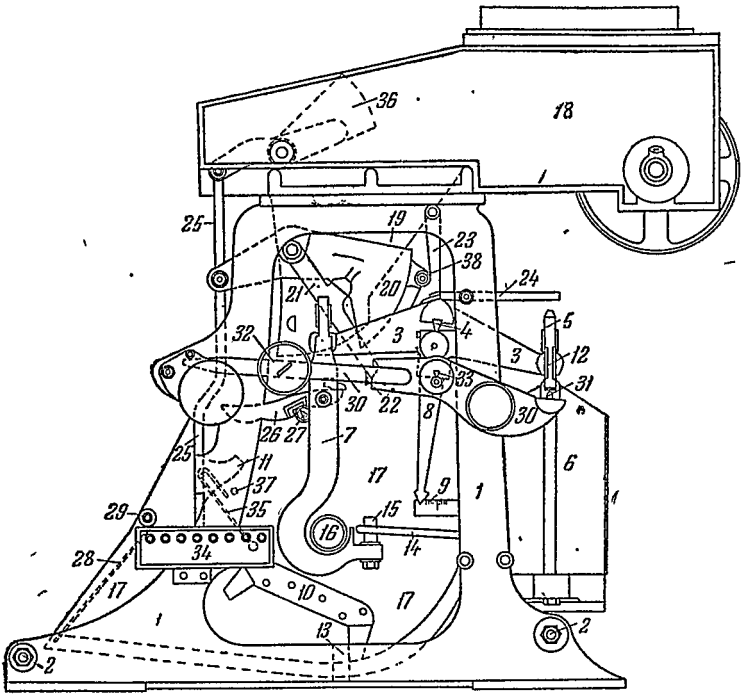


Рис. 60. Автоматические ковшевые весы:

1 — боковые рамы станины; *2* — распорные болты; *3* — двойное коромысло весов; *4* — опорные призмы; *5* — палец гиредержателя; *6* — гиредержатель; *7* — подвески ковша; *8* — стрелка; *9* — шкала; *10* — упор ковша; *11* — отросток тяги *25*; *12* — рамка гиредержателя; *13* — приливы станины; *14* — струнки; *15* — пальцы струнок; *16* — опорные призмы ковша; *17* — ковш весов; *18* — питатель; *19* — загрузочная воронка; *20* — заслонка воронки; *21* — опорный рычаг заслонки; *22* — опорная призма; *23* — запирающий рычаг; *24* — стопорный рычаг; *25* — тяга; *26* — щеколда ковша; *27* — призма щеколды; *28* — фартук; *29* — ось фартука; *30* — регулятор; *31* — палец регулятора; *32* — передвижная гиря регулятора; *33* — опорная призма регулятора; *34* — счетчик; *35* — поводок счетчика; *36* — сектора питателя; *37* — палец; *38* — ролик заслонки.

на подвесках *7* ковш *17*. Центр тяжести пустого ковша лежит справа от опорных призм *16*, а центр тяжести наполненного ковша смещается влево от опор. К коромыслу *3* укреплена стрелка *8*, движущаяся по шкале *9* и указывающая момент равновесия весов. Для устранения раскачивания ковша он соединен со станиной весов двумя струнками *14*, надетыми на пальцы *15*.

Подача материала осуществляется качающимся желобом через питательную воронку *19*, устье которой перекрывается заслонкой *20*. Ковш *17* удерживается от опрокидывания щеколдой *26*, в которую упирается призма *27*, укрепленная на торцевой стенке ковша. Отбрасывание щеколды и освобождение ковша при достижении равновесия выполняются тягой *25*, связанной с заслонкой *20*, и эксцентричными секторами *36*, выключающими питатель.

При опрокидывании ковша материал высыпается из него через щелевидное отверстие, закрываемое фартуком *28*, вращающимся вокруг оси *29*. В момент отсечки подачи материала на весы заслонкой *20* некоторое количество материала находится в полете между устьем воронки и поверхностью его в ковше. Это количество добавится к материалу в ковше и создаст перевес, если заслонка *20* будет закрываться точно в момент достижения равновесия весов. Следовательно, для точного взвешивания необходимо создать некоторое опережение закрытия заслонки. В рассматриваемых весах опережение достигается действием регулятора *30*, представляющего собою рычаг первого рода, опирающийся призмой *33* на консоль станины и подпирающий пальцем *31* рамку *12* гиредержателя, уменьшая тем самым вес гирь. Передвижная гиря *32* служит для точного регулирования механизма весов. Число опрокидываний ковша, т. е. число отвешенных порций материала, отсчитывается счетчиком *34*, приводимым в движение пальцем *37*, укрепленным на ковше, и поводком *35*, связанным храповым механизмом с осью счетчика.

Работа механизма весов протекает следующим образом. Материал, подаваемый качающимся питателем, поступает через воронку *19* в ковш *17*. По мере наполнения ковша коромысло *3* постепенно отклоняется и ковш *17* опускается вниз, а гиредержатель поднимается. При положении коромысла, близком к равновесию, ковш *17* опустится настолько, что рычаг *21*, подпирающий заслонку *20*, соскочит с призмы *22*. Заслонка *20*, освободившись, повернется на некоторый угол, прикрыв отверстие воронки, и уменьшит таким образом подачу материала на весы. Полностью закрыть отверстие воронки заслонка *20* не может, так как при ее движении ролик *38* заслонки ляжет на уступ рычага *23*, подпертого рычажком *24*. По достижении почти полного равновесия палец *5* гиредержателя отклонит рычажек *24*, освобождая тем самым рычаг *23*. Ролик заслонки *20* соскользнет с уступа рычага *23* и заслонка закроет питательную воронку, прекратив подачу материала на весы. Поворот заслонки *20* вызовет передвижение связанной с ней тяги *25* вверх и поворачивание секторов *36*, прекращающих движение питателя. Ковш *17* по инерции, а также под действием веса материала, упавшего в него, после закрытия заслонки *20* будет продолжать опускаться вниз; щеколда *26* при этом движении натолкнется на отросток *11* тяги *25*. Щеколда соскочит с призмы *27* и освобожденный ковш повернется и выбросит взвешенную порцию материала. Поворачивание ковша ограничивается отростками упора *10* и приливом *13* на станине весов.

Как только часть материала высыпется из ковша, гиредержа-

тель перевесит ковш и, опустившись, освободит рычажок *24*, который снова станет в рабочее положение и получит возможность подпереть рычаг *23*. По окончательном опорожнении ковша, центр тяжести его переместится вправо от оси вращения и ковш станет поворачиваться в обратном направлении. При этом призма *22* захватит рычаг *21* и, поворачивая его против часовой стрелки, откроет заслонку *20*. Заслонка в свою очередь опустит тягу *25*, последняя повернет сектора *36* и этим включит питатель, который снова начнет подавать материал на весы.

Эта система весов имеет сравнительно невысокую точность: погрешность весов составляет от $\pm$ 0,5 до $\pm$ 1,0%. При взвешивании крупнокусковых материалов уравновешивание весов становится невозможным, так как недостача или излишек одного куска материала может дать чувствительную разницу в весе. В таких случаях в систему весов вместо регулятора вводится приспособление, учитывающее излишек веса материала в ковше сверх веса гирь. Заслонка в этом случае закрывается в момент прихода коромысла в горизонтальное положение, вследствие чего в ковше весов всегда имеется избыток веса.

Для учета этого избытка применяется приспособление, устройство которого изображено на рис. 61. Подвеска ковша *1* несет серьгу *2*, связанную ножевым шарниром с квадрантом *3*. Излишек веса в ковше заставляет ковш опускаться ниже положения равновесия, поворачивая квадрант *3* на угол, пропорциональный излишку веса. Квадрант *3* храповым зацеплением связан с нижним рядом цифр счетчика, отмечающего и суммирующего величины излишков. Верхний ряд цифр счетчика, как обычно, отсчитывает и суммирует опрокидывания ковша. Количество материала, прошедшего через весы, определяется суммой показаний обоих рядов цифр счетчика.

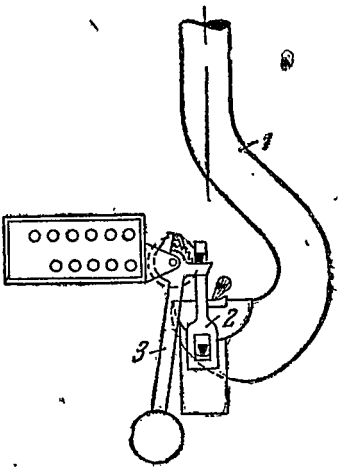


Рис. 61. Механизм взвешивания излишков:

1 — подвеска ковша; *2* — серьга; *3* — весовой квадрант.

Ковшевые весы строятся с различной емкостью ковшей: 100, 200, 300, 400 и 500 *кг*. Максимальное число опрокидываний ковша составляет 150 в час. Нормальная работа весов — два опрокидывания в минуту.

Весы с опрокидывающимся ковшом дают сильные удары и требуют солидного фундамента.

Для взвешивания тонкозернистых ценных материалов точность автоматических весов может быть повышена и погрешность их доведена до $\pm$ 0,1% введением более совершенных регуляторов и разделения наполнения ковша на два периода: периода наполнения, в течение которого материал поступает в ковш полной струей,

и досыпочного периода, в течение которого материал подается тонкой струйкой до достижения равновесия.

Автоматические весы с открывающимся днищем ковша системы Авари. Весы с открывающимся днищем (рис. 62) также построены по принципу равноплечих рычажных весов. К одному концу коромысла *1* подвешен гиредержатель *2*, к другому ковш *3*. Материал поступает через воронку *4*, перекрываемую заслонкой *5*. Вес материала, поступающего в ковш, заставляет

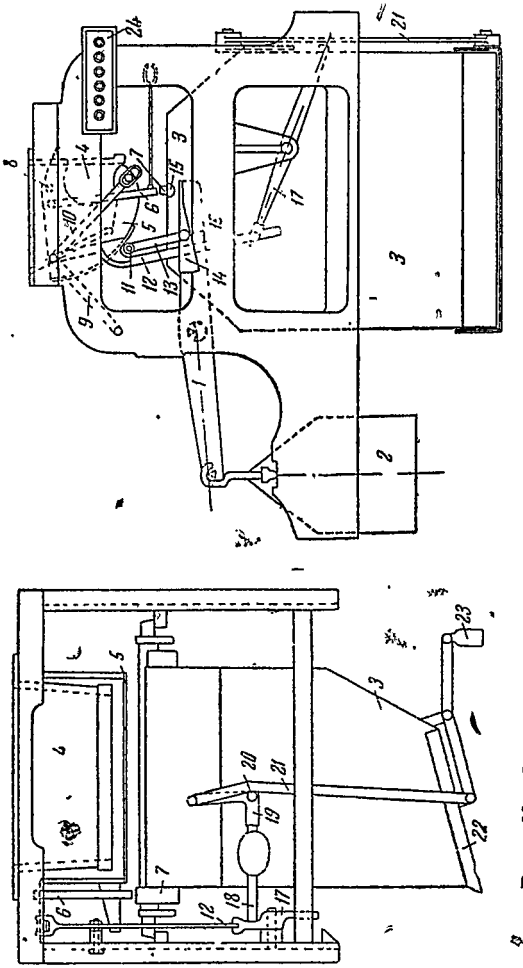


Рис. 62. Автоматические ковшевые весы с открывающимся днищем:
1 — коромысло весов; *2* — гиредержатель; *3* — ковш; *4* — загрузочная воронка; *5* — заслонка; *6* — штанга; *7* — кулак; *8* — ось заслонки; *9—10* — рычажный механизм; *11* — ролик рычага *12*; *12* — рычаг; *13* — палец собачки; *14* — собачка; *15* — упор; *16* — ось собачки; *17* — рычаг; *18* — выдвижной стержень; *19* — рычаг; *20* — ось рычага *19*; *21* — тяга; *22* — дно ковша; *23* — противовес; *24* — счетчик

последний опускаться. При опускании ковша опускается также штанга *6*, опирающаяся на кулак *7*, укрепленный на стенке ковша. При этом заслонка *5*, шарнирно связанная со штангой *6*, поворачивается вокруг оси *8*, постепенно прикрывая отверстие воронки *4*. Поворот заслонки *5* вызывает также поворот системы рычагов *9* и *10*. Движение рычагов *9* и *10* и заслонки *5* прекращается с момента встречи ролика *11* на рычаге *12* с пальцем *13* на собачке *14*. С этого момента начинается досыпной период. Окончательное закрытие заслонки *5* произойдет в тот момент, когда ковш *3* опустится настолько низко, что упор *15* повернет собачку *14* вокруг оси *16*, освобождая ры-

чаг *12*. Рычаг *12*, падая вниз, увлекает за собою рычаги *9* и *10*, закрывающие окончательно заслонку *5*. Рычаг *12* при своем падении толкает левое плечо рычага *17*, а последний своим правым плечом ударяет по выдвижному стержню *18* рычага *19*. Рычаг *19*, поворачиваясь по часовой стрелке вокруг оси *20*, тягой *21* открывает дно *22* ковша *3*. Как только часть материала высыпется из ковша, гиредержатель *2* перевесит ковш *3* и кулак *7* начинает давить на штангу *6*, стремясь открыть заслонку. Однако заслонка не может открыться, так как система рычагов *9* и *10* распрямилась и рычаг *10* левой стороной своего выреза не дает заслонке повернуться.

По опорожнении ковша дно *22* под действием противовеса *23* закрывается. Рычаг *19* повертывается вокруг оси *20* против часовой стрелки, стержнем *18* ударяет по рычагу *17*, а последний поднимает систему рычагов *12*, *9* и *10*, чем заслонка *5* освобождается и открывает отверстие воронки. Как только ролик *11* на рычаге *12* поднимется выше пальца *13*, собачка *14* своим весом поворачивается и палец *13* подпирает ролик *11*, задерживая заслонку в открытом положении. Число опоражниваний ковша отсчитывается счетчиком *24*, связанным с заслонкой *5*.

Весы Авери строятся с ковшами на 100, 200, 300 и 400 *кг*. Точность их достигает $\pm$ 0,1%, а чувствительность 0,05% от предельной нагрузки.

Весы с открывающимся днищем работают значительно спокойнее весов с опрокидывающимся ковшом.

Транспортерные автоматические весы Шенка завода «Госметр». На рис. 63 схематически показано устройство транспортерных весов. Весы состоят из жесткой станины (не показанной на рисунке), к которой крепятся неподвижные опорные детали весового и счетного механизма. Рама *1*, снабженная несколькими роликами *2*, по которым движется транспортерная лента, является весовой платформой. Платформа подвешена четырьмя тягами *3* к двум треугольным весовым рычагам *4*. Платформа весов увлекается лентой по направлению ее движения, причем неравномерность хода ленты может вызвать раскачивание платформы и прижимание ее к неподвижной части транспортерной рамы. Для устранения этого платформа прикреплена к станине весов четырьмя специальными струнами, не препятствующими вертикальному перемещению ее в необходимых пределах.

Рычаги *4* опираются призмами на четыре подушки *5*, закрепленные на станине весов. Другие концы рычагов *4* серьгами *6* связаны с передаточным рычагом *7*. Передаточный рычаг является обратным рычагом, т. е. опора его расположена сверху рычага, так как силы на него действующие стремятся перемещать его вверх. Передаточный рычаг *7* другим концом связан серьгой *8* с квадрантом *9*. Квадрант состоит из горизонтального рычага *9*, опирающегося призмой на подушку *10*, укрепленную на станине весов. В точке опоры рычаг *9* имеет вертикальный отросток *11*, на котором могут двигаться грузы *12* и *13*.

На продолжении рычага за точкой опоры помещены уравновешивающие грузы *14* и *15*. Грузы *12* и *14* устанавливаются при наладке весов и закрепляются предохранительными шпильками на своих местах. Малые грузы *13* и *15* могут передвигаться и служат для регулировки весов во время эксплоатации. К рычагу *9* квадранта шарнирно закреплена тяга масляного катаракта *16*, устраняющего резкие колебания квадранта.

В полотне рычага *9* укреплена также подушка *17*, служащая ограничителем движения рейки *18* счетного устройства. Конец ры-

чага *9* выполнен в виде стрелки, движущейся вдоль вертикальной шкалы *19*, имеющей две отметки. Верхняя отметка соответствует отсутствию груза на платформе; при этом рычаг *9* отклонен на небольшой угол α вверх от горизонтали, а грузы *12* и *13* находятся на вертикали, проведенной через точку опоры. Момент грузов ра-

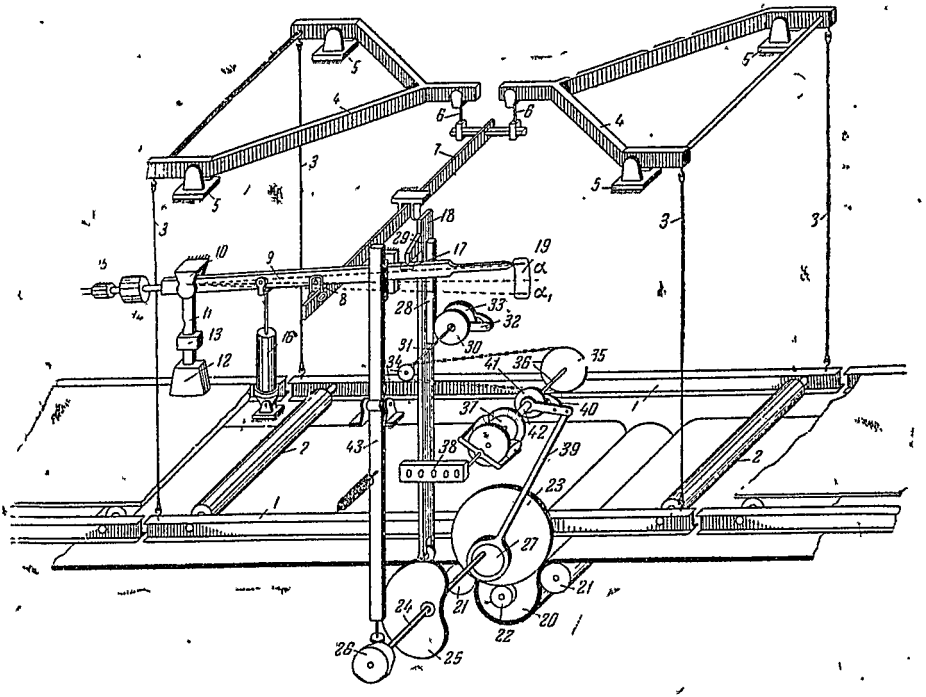


Рис. 63. Автоматические транспортерные весы Шенка:

1 — рама весов; *2* — ролики; *3* — тяги; *4* — весовые рычаги; *5* — подушки рычагов; *6* — соединительные серьги; *7* — обратный рычаг; *8* — серьга обратного рычага; *9* — весовой квадрант; *10* — подушка квадранта; *11* — вертикальный отросток; *12—13* — грузы квадранта; *14* и *15* — уравновешивающие грузы; *16* — катаракт; *17* — опорная подушка; *18* — рейка счетного устройства; *19* — шкала; *20* — приводной барабан; *21* — натяжные ролики; *22* — шестерня; *23* — зубчатое колесо; *24* — ось зубчатого колеса; *25* — кулисса; *26* — кулак тормоза; *27* — эксцентрик корректора; *28* — зубчатая рейка; *29* — призма рейки; *30* — шестерня; *31* — ось шестерни; *32* — обойма собачек; *33* — храповое колесо; *34* и *35* — звездочки; *36* — ось звездочки *35*; *37* — дифференциал; *38* — счетчик; *39* — шатун; *40* — собачка шатуна; *41* — храповое колесо; *42* — полый вал храповика; *43* — рычаг тормоза.

вен нулю. Нижняя отметка шкалы отвечает наибольшей расчетной нагрузке на платформу весов. Рычаг *9* наклонен на некоторый небольшой угол α_1 вниз от горизонтали, а грузы квадранта на сумму углов $\alpha + \alpha_1$ влево от вертикали. Каждой нагрузке на транспортер в пределах от нуля до максимальной будет соответствовать определенное положение рычага *9* между обеими отметками шкалы. Благодаря малой величине углов α и α_1 закон отклонения рычага *9* под влиянием нагрузки может быть принят линейным.

Регистрирующий механизм весов складывается из приводного механизма и счетного устройства.

Приводной механизм состоит из приводного барабана *20*, приводимого в движение холостой ветвью ленты транспортера. Для лучшего охвата барабана лента натягивается двумя роликами *21*. На оси приводного барабана жестко насажена шестерня *22*, являющаяся начальным звеном привода. Шестерня *22* сцеплена с зубчатым колесом *23*, насаженным на ось *24*. На оси *24* закреплены почкообразная кулисса *25* рейки счетного устройства, кулак *26* зажимающего механизма и эксцентрик *27* корректирующего механизма.

Счетное устройство работает от рейки *28*, движущейся вверх и вниз кулиссой *25*. Движение рейки вверх определяется очертанием профиля кулиссы и всегда одинаково; движение вниз ограничивается призмой *29*, закрепленной в рейке и упирающейся в подушку *17* рычага *9*.

Таким образом, длина нисходящего пути рейки определяется положением в данный момент рычага квадранта, а следовательно, величиной нагрузки на платформу весов. Это обстоятельство используется для регистрации количества материала, проходящего по транспортеру. Отсчет выполняется следующим устройством. Рейка *28* имеет на боковой поверхности зубчатую нарезку, сцепляющуюся с шестерней *30*, свободно сидящей на оси *31*. Шестерня несет на себе обойму собачек *32*, захватывающих при движении рейки вниз храповое колесо *33*, сидящее на той же оси *31*, но жестко на ней закрепленное. На оси *31* жестко насажена звездочка *34*, связанная цепью Галля со звездочкой *35*, сидящей на оси *36*, на которой также насажено большое колесо дифференциала *37*. Обойма паразитных шестерен дифференциала связана со счетчиком *38*, отсчитывающим и суммирующим вес прошедшего по транспортеру материала.

Так как для обеспечения свободных колебаний рычага квадранта рейка поднимается на 10—12 *мм* выше крайнего верхнего положения подушки *17*, то счетчик при опускании рейки постоянно засчитывал бы лишний вес, пропорциональный величине холостого хода рейки. Для корректирования этой ошибки служит эксцентрик *27*, который при помощи шатуна *39* с собачкой *40* при каждом ходе рейки поворачивает храповое колесо *41*, сидящее на полом валу *42*. На валу *42* закреплено второе колесо дифференциала, поворот которого соответственно уменьшает поворот обоймы паразитных шестерен, компенсируя холостой ход рейки.

Для устранения излишнего поворота колес счетного устройства по инерции на осях этих колес установлены шкивы ленточных тормозов, захватываемые тормозными лентами в момент остановки рейки при ее движении вниз.

Работа счетного устройства протекает следующим образом. При поворачивании кулиссы *25* рейка *28* поднимается в крайнее верхнее положение и удерживается в нем некоторое время благодаря тому, что опорный ролик рейки скользит по части профиля кулиссы, имеющей постоянную кривизну. В это время рычаг квадранта

занимает положение, соответствующее нагрузке на платформе весов. Далее кулак *27* освобождает рычаг *43* прихвата квадранта и прихват под действием пружины зажимает рычаг *9* квадранта, фиксируя его положение. В этот момент опорный ролик рейки переходит на участок профиля кулиссы с возрастающей кривизной и рейка начинает опускаться вниз до встречи призмы рейки с подушкой *17* рычага *9*. Колеса счетного устройства поворачиваются на угол, соответствующий длине хода рейки, и счетчик присчитывает вес материала к имеющейся сумме. Корректор в это время исправляет угол поворота за счет холостого хода рейки. Далее, рейка снова подхватывается кулиссой и начинается движение вверх, а кулак *27* захватывает рычаг *43*, освобождая квадрант для свободной установки в новом положении, соответствующем нагрузке. Далее циклы повторяются. Точность взвешивания этими весами не высока, так как погрешность достигает $\pm$ 5% от веса материала. Механизм весов чувствителен к запылению, неизбежному при взвешивании дисперсного материала. Весы нуждаются во внимательном квалифицированном уходе.

В настоящее время у нас и в США разработаны более совершенные конструкции, в которых сложный кинематический механизм заменен электрической схемой управления. Удачное решение конструкции транспортерных весов имеет большую ценность для многих химических производств, так как взвешивание этими весами не нарушает непрерывности и плавности производственного процесса.

Объемные измерители. Измерение количества твердых материалов объемным методом применимо лишь для порошкообразных сыпучих материалов постоянного гранулометрического состава, не склонных к комкованию и слеживанию, т. е. для материалов с более или менее постоянным насыпным (объемным) весом.

Для измерения объемным способом применяются ячейковые питатели, соединенные со счетчиком оборотов. Так как количество материала, прошедшего через питатель за один оборот барабана, равно числу ячеек, помноженному на объем одной ячейки, счетчик может быть градуирован непосредственно в объемных единицах.

Другой, применяющийся метод объемного измерения сыпучего материала заключается в измерении толщины слоя материала, движущегося по ленточному транспортеру. Интегратор простейшего вида суммирует количество материала, прошедшего по транспортеру. Принцип интегрирующего механизма заключается в умножении скорости движения ленты транспортера на толщину слоя. Произведение этих двух величин отмечается счетчиком.

Объемные измерители сыпучих материалов дают невысокую точность измерений и их следует применять только в тех случаях, когда по каким-либо причинам невозможно использовать весы.

20. Измерители количества и расхода жидкостей

Весовые измерители количества жидкостей. В противоположность измерению количества твердых тел, основными методами измерения количества жидкости являются объемный и скоростной, а весовой метод играет меньшую роль. Тем не менее на одном из весовых измерителей, называемом водомером Штейнмюллера, следует остановиться.

Водомер Штейнмюллера (рис. 64) состоит из двух прямоугольных измерительных сосудов *1* и *2*, качающихся вокруг оси *3*. Пределы качаний ограничиваются упорами *4* и *5*.

К задней стенке каждого сосуда прикреплена плита *6*, играющая роль противовеса. Положение оси вращения *3* установлено таким образом, что центр тяжести пустого сосуда лежит справа от оси *3* и сосуд находится в вертикальном положении, опираясь на упор *4*. По наполнении сосуда определенным весом жидкости центр тяжести перемещается влево от оси и сосуд наклоняется до встречи с упором *5*.

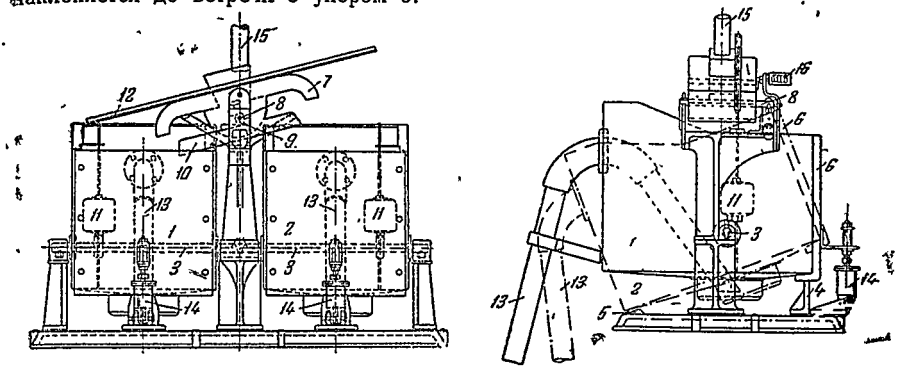


Рис. 64. Весовой водомер Штейнмюллера:

1 и *2* — измерительные сосуды; *3* — ось вращения измерительных сосудов; *4* и *5* — опоры сосудов; *6* — противовес; *7* — распределительный желоб; *8* — ось вращения желоба; *9* — отверстие в полой оси *8*; *10* — дополнительный желоб; *11* — поплавки; *12* — перекидывающий рычаг; *13* — сифон; *14* — буфера; *15* — подающая трубка; *16* — счетчик.

Жидкость поступает в сосуды *1* и *2* из распределительного желоба *7*, который может качаться около оси *8*. В зависимости от положения желоба жидкость поступает либо в один, либо в другой сосуд. Ось *8* полая и снабжена небольшим отверстием *9*, через которое жидкость тонкой струей поступает в один или другой сосуд по дополнительному качающемуся желобку *10*.

В положении прибора, изображенном на рис. 64, жидкость по обоим желобам *7* и *10* поступает в сосуд *1*. Когда жидкость в сосуде достигнет определенной высоты, поплавок *11*, действуя на рычаг *12*, перебрасывает желоб *7* на сосуд *2*; сосуд *1* продолжает медленно наполняться по желобку *10*. Поверхность жидкости в сосуде *1* в это время успокаивается. Когда вес жидкости в сосуде *1* достигнет определенной величины, сосуд опрокидывается в положение, указанное на рис. 64 пунктиром, опираясь на упор *5*; одновременно желобок *10* перебрасывается на сосуд *2*. Сосуд *1* быстро опоражнивается через сифон *13* и после этого возвращается в первоначальное положение. Процесс для сосуда *2* протекает таким же образом. Число колебаний обоих сосудов отмечается счетчиком *16*, указывающим непосредственно вес жидкости, прошедшей через прибор.

Точность прибора, основанного на весовом принципе, весьма высока. Погрешность не превышает + 0,1%, т. е. точность несравненно выше, чем в приборах других систем. Кроме того, прибор не нуждается в поправках на температуру.

Недостатком прибора является периодичность и порционность измерений и необходимость разрыва трубопровода, поэтому прибор не может быть включен в линию, работающую под давлением, и не пригоден для жидкостей легко летучих или чувствительных к действию кислорода воздуха.

Приборы для измерения объема жидкости. К измерителям объема жидкостей относятся разнообразные приборы, начиная от простейших мерников и кончая сложными поршневыми расходомерами.

Мерники. Простейшим прибором для измерения объема жидкости является мерный бак, или мерник. Мерник представляет собой сосуд любого поперечного сечения с коническим или пирамидальным дном, в наинизшей точке которого расположен спускной клапан. Мерник снабжается каким-либо измерителем уровня: водомерным стеклом со шкалой, поплавковым измерителем с градуированной рейкой и т. п. Для градуирования мерника существует три способа: весовой, объемный и геометрический. По весовому способу производят последовательное взвешивание мерника при повышении уровня жидкости на одно деление шкалы; это наиболее точный, но и наиболее громоздкий способ. По объемному способу вливают в мерник отдельные порции жидкости из точно измеренного сосуда определенной емкости и отмечают на шкале последовательное повышение уровня. Это наиболее часто применяемый метод. По геометрическому способу вычисляют объем мерника и доли объема по размерам сосуда; этот способ пригоден только для очень грубых измерений, так как неточность геометрической формы, неизбежная при изготовлении мерника, может дать погрешность, доходящую до 10%.

Точность измерения жидкости мерником, при прочих равных условиях, зависит от цены деления шкалы мерника, т. е. от отношения высоты мерника к его диаметру или поперечному сечению. Чем это отношение больше, тем выше точность измерения, так как с увеличением отношения $\frac{H}{D}$ уменьшается цена деления шкалы и отсчет может быть сделан с большей точностью. На практике отношение $\frac{H}{D}$ колеблется в пределах от 1 : 1,5 до 1 : 4,0; наиболее удобными отношениями следует считать 1 : 2,5 и 1 : 3,0. Угол наклона днища, т. е. угол между образующей днища и горизонтальной плоскостью, в зависимости от свойств жидкости (вязкость, наличие взвешенных частиц, их количества и характера) принимают в 60, 45, 30, 22,5 и 15°. Большая величина угла выбирается для более вязких и загрязненных жидкостей.

Достоинства мерников заключаются в возможности измерения сколь угодно малых количеств жидкости и в применимости мерников для измерения сильно загрязненных жидкостей и суспензий.

Для обеспечения непрерывности подачи жидкости необходимо иметь два одинаковых мерника, попеременно наполняемых и опорожняемых. Объемы мерников должны находиться в определенной зависимости от величины часового расхода жидкости (см. табл. 2).

Таблица 2

Зависимость емкости мерников от часового расхода жидкости

Часовой расход в $м^3/час$	< 5	5—10	10—15	15—20	20—25	25—30	30—40
Минимальный объем каждого мерного бака в $м^3$	0,5	1,0	1,3	1,7	2,0	2,5	3,0

так как на наполнение и опорожнение мерника затрачивается определенное время. Мерники градуируются для каждой жидкости при определенной температуре. Если рабочая температура отличается от градуировочной, необходимо вводить поправки на расширение мерника и расширение самой жидкости. Изменение объема мерного бака можно подсчитать по формуле:

$$V_t = V_0 \frac{1 + 3\alpha t}{1 + 3\alpha t_0}, \qquad (63)$$

где V_t — объем мерника при рабочей температуре;
V_0 — объем мерника при градуировочной температуре;
α — коэфициент линейного расширения материала мерника;
t — рабочая температура;
t_0 — градуировочная температура.

Расширение жидкости легче всего учитывать по изменению плотности, помножив найденный объем V_t на отношение $\frac{\gamma_t}{\gamma t_0}$, где γ_t — плотность жидкости при рабочей температуре;
γ_{t_0} — плотность жидкости при градуировочной температуре.

Часовой расход жидкости при измерении мерниками находится по формуле:

$$\sigma = \frac{(nV + V_1)\gamma}{\tau} \ кг/час, \qquad (64)$$

где σ — часовой расход жидкости в *кг/час*;
n — число полных мерников, опорожненных в течение τ часов;
V — объем полного мерника в *л*;
V_1 — объем части мерника, спущенный сверх полных мерников, в *л*;
γ — плотность жидкости в *кг/л*;
τ — время измерения в часах.

Объемный водомер Эккардта. Водомер Эккардта (рис. 65) состоит из бака *1*, внутри которого на призменных опорах качается мерный бак *2*, разделенный перегородкой на две равные части, имеющие форму трехгранных призм. Качания бака ограничиваются упорными буферами *3*. Обе части мерного сосуда снабжены воронками *4* для наполнения и желобами *5* на внешних краях обеих частей мерника. Форма обоих мерников такова, что центр тяжести сосуда при наполнении жидкостью остается в плоскости, проходящей через опорную призму.

Жидкость подается в воронки *4* по открытому трубопроводу *6* и вытекает из бака *1* по трубе *7*. При наполнении левого сосуда, как изображено на рис. 65, до края желоба жидкость начинает переливаться в желоб, центр тяжести системы перемещается влево от оси вращения, равновесие нарушается и сосуд *2* опрокидывается влево. Жидкость из левого сосуда выливается в бак *1*, а воронка правого сосуда подходит под трубу *6* и начинается напол-

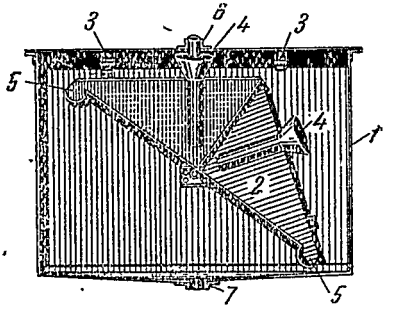


Рис. 65. Объемный водомер Эккардта:
1 — бак; *2* — мерный бак; *3* — упорные буфера; *4* — воронки; *5* — желоба; *6* — подающий трубопровод; *7* — сливной трубопровод.

жение правого сосуда. Число опрокидываний мерного бака отмечается счетчиком, градуированным в объемных единицах. Точность водомера ± 2%.

Недостатком этого прибора следует признать порционность измерений и невозможность измерений жидкостей под давлением.

Барабанный счетчик жидкости Сименса. Барабанный счетчик жидкости Сименса (рис. 66) состоит из закрытого кожуха цилиндрической формы, внутри которого концентрически помещен барабан *1*, разделенный перегородками *2* на несколько отсеков. Барабан *1* может вращаться вокруг полой оси *4*, через которую внутрь барабана поступает измеряемая жидкость. Внутренняя полость *3* барабана, куда поступает жидкость, соединена щелями b_1, b_2, b_3 с отсеками *I*, *II*, *III*, а последние щелями e_1, e_2, e_3 с пространством кожуха. По заполнении отсека, лежащего в данный момент внизу, жидкость, поднимаясь в кольцевой щели e_1, своим весом вызывает вращение барабана против часовой стрелки, при этом отверстие b_1 выходит из-под уровня жидкости в цилиндре, прекращая доступ жидкости в отсек *I*.

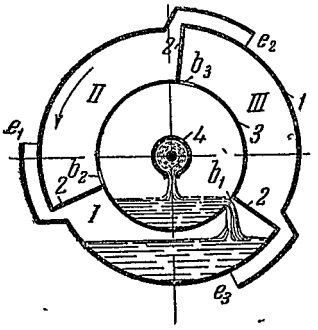


Рис. 66. Схема барабанного счетчика Сименса:

1 — мерный барабан; *2* — перегородки; *3* — внутренний цилиндр; *4* — полая ось; b_1, b_2, b_3 — внутренние щели; *I*, *II*, *III* — отсеки барабана; e_1, e_2, e_3 — наружные щели.

Одновременно отверстие b_2 подходит под уровень жидкости в цилиндре, и жидкость начинает поступать в отсек *II*, увеличивая вращающий момент. Жидкость из отсека *I* в это время выливается в кожух, удаляясь из него по трубе. В результате отсек *II* переходит в крайнее нижнее положение на место отсека *I* и процесс продолжается непрерывно. Вращение барабана передается счетчику, расположенному снаружи кожуха, отмечающему количество прошедшей через барабан жидкости в объемных или весовых единицах.

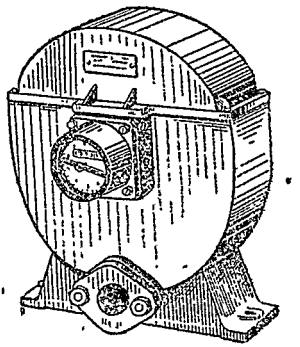


Рис. 67. Барабанный счетчик Сименса.

Барабан счетчика выполняется из листового металла: латуни, бронзы, монель-металла, стали Я1 и т. п. Для измерения весьма агрессивных жидкостей, разъедающих металлы, барабан и кожух счетчика могут быть выполнены из керамической кислотостойкой массы. На рис. 67 изображен наружный вид прибора. Как видно на рисунке, доли оборота барабана отсчитываются стрелкой, движущейся по круговой шкале, а полные обороты счетчиком с переставляющимися цифрами.

Подвод жидкости к барабану может производиться под давлением, не превышающим 0,4 *кг/см²*. Для легколетучих жидко-

стей кожух счетчика выполняется герметичным, рассчитанным на давление до 2 *кг/см*². Достоинства прибора заключаются в сравнительно высокой точности измерений (+ 0,5 до + 1,0% от измеряемого количества) и большом допускаемом колебании расхода, при котором сохраняется точность измерения.

Немаловажным преимуществом является также простота конструкции, позволяющая изготовлять прибор из любых коррозиоустойчивых материалов, в том числе из керамических масс, что делает их пригодными для измерения весьма активных жидкостей.

Счетчики изготовляются фирмой Сименс-Гальске нескольких размеров с объемом барабана от 1 до 60 *л* и производительностью от 2,5 до 12 000 *л/час*.

Поршневые измерители объема жидкости. Поршневые измерители количества жидкости представляют собой водостолбовую машину с одним или несколькими поршнями. Так как объем, описываемый поршнем в цилиндре, является постоянной и строго определенной величиной, то, отмечая число ходов поршня, можно определить количество жидкости, прошедшее через измеритель, с достаточной точностью. Поршневые измерители выгодно отличаются от описанных выше тем, что могут быть включены в трубопровод, работающий под давлением, не нарушая непрерывности потока. К недостаткам относятся сложность конструкции, возможность использования их только для неактивных жидкостей и зависимость их работы от состояния движущихся деталей, так как потеря плотности поршня ведет к резкому увеличению погрешности прибора. Следует также указать, что поршневые измерители создают довольно большую потерю напора.

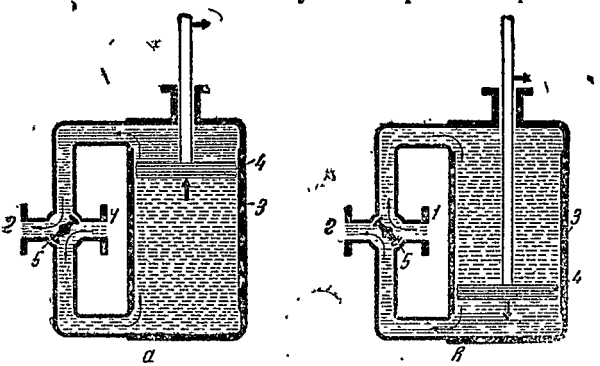


Рис. 68. Схема поршневого счетчика Кеннеди:
1 — входной патрубок; *2* — выходной патрубок; *3* — цилиндр; *4* — поршень; *5* — золотник.

Поршневой счетчик Кеннеди. Поршневой счетчик Кеннеди имеет один измерительный поршень, двигающийся в вертикальном цилиндре. Схема действия счетчика представлена на рис. 68. Распределение жидкости по ту и другую сторону поршня производится четырехходовым краном.

На фиг. *а* рис. 68 показано положение, предшествующее моменту перестановки распределительного крана. Жидкость поступает в патрубок *1* и проходит через распределительный кран в нижнюю полость цилиндра. Напор жидкости поднимает поршень, вытесняя жидкость, находящуюся в верхней полости цилиндра, через распределительный кран и патрубок *2*. В момент достижения поршнем крайнего верхнего положения распределительный кран переставляется в положение, показанное на фиг. *b* рис. 68, и жидкость из патрубка *1* начинает поступать в верхнюю полость цилиндра, а из нижней полости жидкость вытесняется в патрубок *2*. В крайнем нижнем положении поршня наступает новая перестановка крана, и циклы повторяются безпрерывно, пока к счетчику поступает жидкость.

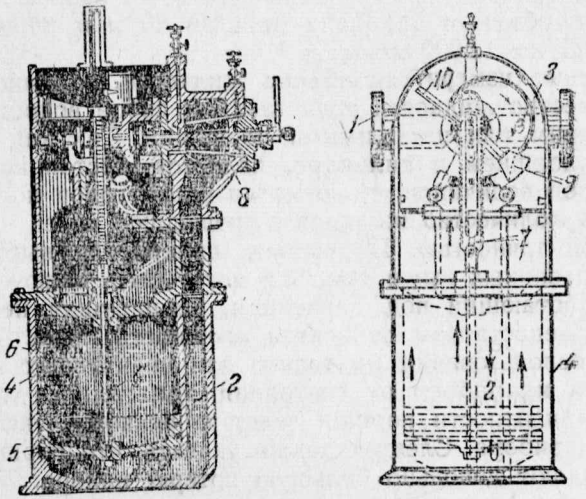


Рис. 69. Поршневой счетчик Кеннеди:

1 — входной патрубок; *2* и *3* — каналы; *4* — цилиндр счетчика; *5* — поршень; *6* — шток поршня; *7* — зубчатая рейка; *8* — четырехходовый кран; *9* — груз; *10* — рычаг четырехходового крана.

Устройство счетчика Кеннеди показано на рис. 69. В чугунном вертикальном цилиндре *4* движется бронзовый измерительный поршень *5*, уплотненный поршневыми кольцами. Шток *6* поршня, проходящий через сальник в верхней крышке цилиндра, связан с зубчатой рейкой *7*. Распределение жидкости выполняется четырехходовым краном *8*, по каналам *2* и *3*. К крану подходят патрубки *1* входной и *3* выходной с фланцами для включения в линию трубопровода.

При движении поршня зубчатая рейка *7* через промежуточную шестеренную передачу вращает шестерню, снабженную пальцем, захватывающим перекидной рычаг с грузом *9* на конце. В конце каждого хода поршня рычаг переходит через верхнее

положение и, падая далее свободно под действием веса груза *9*, ударяет выступом по одному или другому плечу рычага *10*, жестко закрепленного на шпинделе четырехходового крана *8*. Последний поворачивается при этом на 90°, переключая поступление жидкости в цилиндр.

От передаточных шестерен рейки при помощи храповых колес вращается в одном и том же направлении независимо от направления движения поршня ось счетчика, учитывающего количество протекшей через измеритель жидкости. Так как угол поворота оси счетчика пропорционален длине хода поршня, а длина хода пропорциональна объему вытесненной из цилиндра жидкости, то небольшие отклонения хода поршня в моменты перебрасывания груза *9* не сказываются на точности измерения.

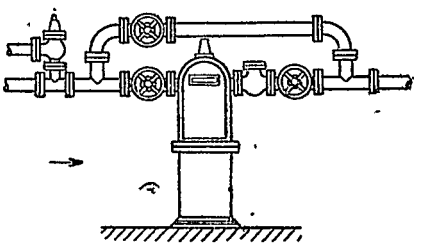


Рис. 70. Установка счетчика Кеннеди на трубопроводе.

Включение счетчика Кеннеди в линию трубопровода требует устройства обводной линии для возможности выключения прибора без нарушения работы линии, а также установки на напорной ветви предохранительного клапана для предупреждения аварии трубопровода при случайном заедании распределительного крана прибора (рис. 70).

Погрешность счетчика Кеннеди при мало колеблющейся нагрузке равна $\pm$ 1,0% измеренной величины.

Нормальная нагрузка счетчика Кеннеди составляет 65—75% максимальной для данного прибора. Предельная кратковременная (пиковая) нагрузка может быть допущена в 110—140% максимальной. Потеря напора в счетчике Кеннеди составляет до 0,2 *кг/см*^{2}. Счетчики строятся для рабочего давления от 1 до 25 *кг/см*^{2}.

Завод «Точприбор» выпускает счетчики Кеннеди для давлений до 15 *кг/см*^{2} производительностью 3,6—25 *м*^{3}*/час*.

Счетчики Кеннеди являются точными и долговечными приборами, пригодными для измерения всевозможных неактивных жидкостей. Недостатками их следует признать громоздкость, сложность конструкции и связанную с этим дороговизну, а также большую потерю напора.

Дисковый счетчик Сименса. К поршневым счетчикам относится дисковый счетчик Сименса, принцип работы которого также заключается в вытеснении определенных объемов движущейся твердой перегородкой. Счетчик (рис. 71) состоит из чугунного или стального корпуса *6*, снабженного двумя штуцерами с фланцами для включения в трубопровод. Внутрь корпуса вставлена измерительная камера *1*, имеющая форму тела вращения, ограниченного двумя коническими и шаровой поверхностями. Внутри камеры помещен диск *2* из эбонита или пустотелый ме-

таллический с шаровой цапфой *3* из графита. Диск плотно прилегает к стенкам измерительной камеры и может поворачиваться на шаровой цапфе, покоящейся в соответствующем гнезде измерительной камеры.

Камера имеет два отверстия для входа и выхода жидкости, разделенные тонкой радиальной перегородкой, входящей в прорез диска и доходящей до шаровой цапфы. Перегородка, разделяя вход и выход жидкости из камеры, одновременно препятствует вращению диска вокруг вертикальной оси. Входное и выходное отверстие измерительной камеры соответственно сообщаются с входным и выходным патрубками корпуса прибора.

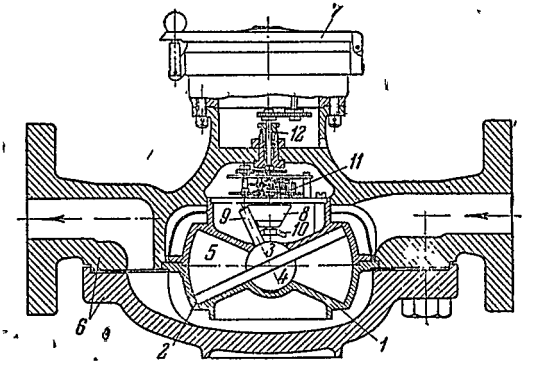


Рис. 71. Дисковый счетчик Сименса:
1 — измерительная камера; *2* — диск; *3* — шаровая цапфа диска; *4* и *5* — полости измерительной камеры; *6* — корпус счетчика; *7* — счетный механизм; *8* — направляющий ролик; *9* — ось диска; *10* — пальцы оси счетного механизма; *11* — зубчатая передача; *12* — ось счетного механизма.

Давление жидкости, входящей в полость *4* измерительной камеры, на поверхность диска заставляет его придти в колебательное движение. Жидкость, находящаяся в это время в полости *5*, будет выдавливаться в выходной патрубок. Полости *4* и *5* во время одного полуколебания диска меняются своими местами. Колеблясь, диск обкатывается своими поверхностями по коническим поверхностям измерительной камеры, описывая за одно полное колебание объем, равный объему камеры. Ось *9* диска, перпендикулярная к его плоскости, перемещается в пространстве по конической поверхности, скользя по направляющему ролику *8*. В своем движении ось *9* захватывает пальцы *10*, сидящие на оси счетного механизма прибора, приводя ее во вращение. Вращение оси системой зубчатых колес *11* передается оси *12*, проходящей через сальник, и далее счетчику *7*, указывающему количество протекшей через прибор жидкости.

Счетчики Сименса изготовляются для нормальных постоянных расходов от 1,5 до 40 *м³/час*.

Они применяются для горячей воды, нефти и других неактивных жидкостей. Максимальная допустимая температура 130°. Счетчики для давлений до 12 *кг/см²* строятся с чугунными корпусами, а выше и до 20 *кг/см²* с литыми стальными.

Минимальное рабочее давление 0,5 *кг/см²*, потеря напора до 0,2 *кг/см²*. Погрешность прибора ±1,0% измеренной величины.

Счетчики Сименса очень чувствительны к наличию взвешенных частиц, что быстро приводит к потере точности. Поэтому

они пригодны для измерения расхода только чистых жидкостей.

Скоростные расходомеры. Группа приборов для измерения количества жидкостей, объединяемая под названием скоростных расходомеров, построена на принципе измерения скорости потока, поскольку скорость потока в заполненном канале связывается с количеством простым соотношением:

$$Q = 3600\,vF, \tag{65}$$

где Q — количество жидкости в $м^3/час$;

v — скорость в $м/сек$;

F — сечение потока в $м^2$.

Измерение скорости в скоростных или, как их часто называют, крыльчатых расходомерах, выполняется легко подвижными колесами турбинного или винтового типа, увлекаемыми во вращение потоком жидкости.

Счетчик Вольтмана применяется для измерения количества холодных и горячих жидкостей при больших расходах. Минимальный расход, для которого применим прибор Вольтмана, равен 1 $м^3/час$, максимальный расход практически не ограничен.

Счетчик Вольтмана (рис. 72) состоит из легкой вертушки с винтовыми крыльями, помещенной по оси цилиндрического патрубка, через который протекает измеряемая жидкость.

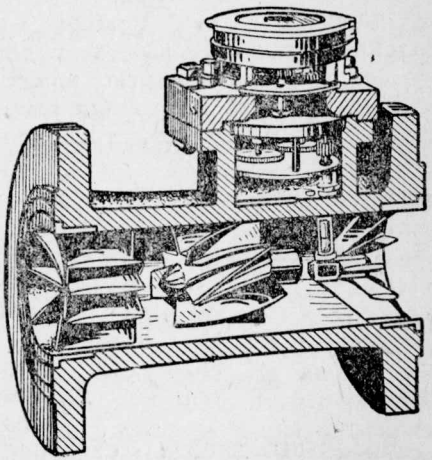


Рис. 72. Скоростной счетчик Вольтмана.

Крыльчатка (вертушка) счетчика выполняется из целлулоида или из легкого металла. Цилиндрический сердечник вертушки делается полым для облегчения веса вертушки и уменьшения давления на цапфы оси. Подшипники оси закрытого типа закрепляются в крестовинах, вставленных в корпус водомера. На длинном конце оси за вертушкой насажен червяк, сцепляющийся с червячным колесом, передающим вращение вертушки счетному механизму.

Ось червячного колеса проходит сквозь сальник, так что счетный механизм работает насухо. Червячная передача закрыта герметическим футляром, защищающим ее от засорения и износа.

Количество жидкости, протекающей через прибор, определяется по формуле:

$$Q = cnF, \tag{66}$$

где Q — количество протекшей жидкости в $м^3/час$;
n — число оборотов вертушки за время измерения;
F — свободное сечение потока в $м^2$;
c — коэфициент (постоянная) прибора.

При больших скоростях работа вертушки приближается к теоретической, что делает возможным точно рассчитать наклон крыльев, чтобы при заданной скорости получить желаемое число оборотов вертушки.

Механические сопротивления—трение в подшипниках, червячной передаче, сальнике и т. п. сильно сказываются при малых числах оборотов, и при некоторой минимальной скорости потока вертушка будет неподвижна. Поэтому для каждого счетчика Вольтмана существует определенный минимальный расход, ниже которого измерение становится весьма неточным.

Для счетчиков Вольтмана характерным или номинальным расходом условно принимается расход при перепаде давления в счетчике, равном 10 *м* вод. ст. Максимальный допустимый расход значительно ниже номинального и определяется скоростью износа.

Так как износ резко ускоряется при измерении загрязненных жидкостей, несущих взвешенные твердые частицы, счетчик следует применять только для чистых жидкостей.

Точная работа счетчика возможна при распределении скоростей по сечению потока, одинаковом с градуировочным. Поэтому наличие вблизи прибора местных сопротивлений (вентили, колена, задвижки) вызывает дополнительные ошибки измерения. Особенно неблагоприятно влияют частично открытые задвижки.

Правильность измерения возможна лишь при заполнении жидкостью всего сечения трубопровода. Поэтому счетчик нельзя располагать вблизи открытого слива или, если это необходимо, следует обеспечить заполнение сечения трубопровода устройством снижения участка его со счетчиком, как показано на рис. 73.

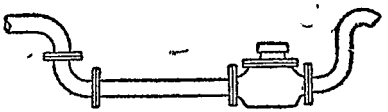


Рис. 73. Установка водомера Вольтмана на конце трубопровода.

В СССР счетчики Вольтмана для холодной и горячей воды выпускает завод «Точприбор» для расходов от 3 до 1500 $м^3/час$.

Водомеры завода «Точприбор» рассчитаны на давление 10 $кг/см^2$. Точность новых приборов $\pm$ 2%.

Счетчики Вольтмана можно присоединять к трубопроводам значительно большего диаметра, чем проход счетчика, коническими переходами при условии совпадения величины расхода.

Крыльчатый счетчик «Космос». В бронзовом цилиндрическом корпусе (рис. 74), снабженном входным и выходным патрубком с нарезными цапфами для присоединения к трубопроводу, помещено на вертикальной оси крыльчатое колесо с радиально поставленными лопастями. Колесо изготовляется из целлулоида для холодных жидкостей или из металла для горячих жидкостей. Струя жидкости, проходя через колесо, заставляет его вращаться. Вра-

щение оси колеса зубчатой передачей, помещенной в верхней части корпуса, передается счетчику стрелочного типа. Счетчики «Космос» строятся двух типов: сухоходный — с сухим счетным механизмом, отделенным непроницаемой перегородкой от полости колеса, ось которого в этом случае проходит через сальник в перегородке, и мокроходный — с затопленным счетным механизмом, не имеющим сальника. Счетчик имеет шесть стрелок: большую — полный оборот которой соответствует 100 *л*, а цена деления 1 *л*, и пять малых (цена деления последней стрелки 1000 $м^3$).

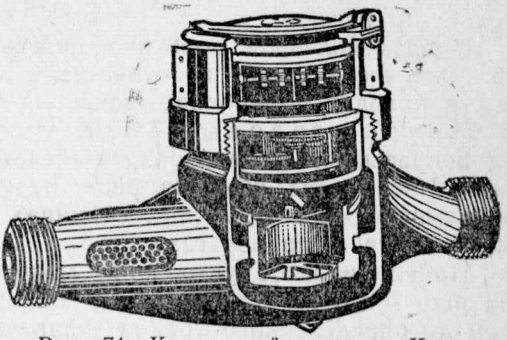


Рис. 74. Крыльчатый счетчик «Космос».

Прибор чувствителен к засорению и поэтому снабжается фильтрующей сеткой во входном штуцере. Так как счетчик не имеет струевыпрямителя, то перед ним должен быть прямой участок трубопровода длиною не менее 30 *d*, а за счетчиком не менее 20 *d*.

Прибор рассчитан на давление 10 $кг/см^2$. Точность ± 2% от измеренной величины. Производительность приборов, изготовляемых заводом «Точприбор», составляет 0,2—10 $м^3/час$.

21. Измерители количества и расхода газов

Измерение газгольдером. Наиболее простой и точный метод объемного измерения количества газа — измерение в газгольдере по степени его наполнения может применяться лишь в тех случаях, когда газ является конечным продуктом производства и имеется не менее двух газгольдеров, работающих поочередно.

Измерение количества газа газгольдером сводится к точному определению степени наполнения газгольдера по высоте подъема колокола мокрого газгольдера или поршня сухого газгольдера. Одновременно измеряется давление газа по манометру, установленному на вводном газопроводе, и температура газа термометром на том же газопроводе. Для точных измерений температура газа контролируется в самом газгольдере, не менее чем в трех различных точках, термометрами, установленными на днище или цилиндре газгольдера. Термометры должны быть опущены вглубь не менее чем на 300 *мм* от поверхности газгольдера. Необходимо также отмечать показания барометра и знать плотность газа.

Для определения количества газа, участвующего в производственном процессе, метод измерения газгольдером не пригоден и в этих случаях применяют приборы, позволяющие измерять количество газа в непрерывном потоке.

К таким приборам относятся так называемые газовые часы, ротационные и крыльчатые газомеры.

Газовые часы. Газовые часы являются старейшим прибором для измерения объемного количества газа, так как основные принципы их работы установлены в начале XIX в. Несмотря на

это, они широко применяются и в настоящее время для лабораторных, бытовых и промышленных измерений.

По своей конструкции газовые часы делятся на мокрые и сухие.

Мокрые газовые часы работают с гидравлическим затвором, сухие без него.

В промышленной практике применяются только мокрые типы газовых часов, сухие же вследствие ограниченной производительности находят применение лишь для бытовых нужд.

Мокрые газовые часы. Работа газовых часов основана на непрерывном отмеривании и отсчете равных объемных порций газа. Число этих объемов регистрируется счетным механизмом, показывающим в объемных единицах суммарное количество прошедшего через прибор газа.

Принципиальное устройство мокрых газовых часов показано на рис. 75. В герметическом цилиндрическом кожухе *1*, заполненном до определенного уровня запирающей жидкостью, вращается концентрично расположенный барабан *2*, разделенный четырьмя радиальными и одной цилиндрической перегородками на пять камер — *I*, *II*, *III*, *IV* и *V*. Камеры *I*, *II*, *III* и *IV* сообщаются с пространством кожуха *1* щелями *a*, *b*, *c*, *d* и с внутренней камерой *V* щелями a_1, b_1, c_1, d_1.

В камеру *V* через полую ось входит подающая газ труба *3*, а в верхней части кожуха установлена отводящая труба *4*. Радиальные перегородки и соединяющие щели расположены так, что газ последовательно наполняет камеры *I*—*IV*. Перепад между давлениями в трубах *3* и *4* заставляет барабан вращаться по часовой стрелке. Входная и выходная щель каждой камеры никогда не могут быть одновременно над уровнем жидкости, следовательно, прямой переток газа из трубы *3* в трубу *4* исключается.

Газ заполняет каждую камеру в определенном постоянном объеме, вытесняемом из камеры в кожух прибора при выходе выпускной щели из-под уровня жидкости.

Вращение барабана передается счетному механизму, расположенному снаружи кожуха.

Современные газовые часы имеют барабан системы Крослея, конструктивно отличающийся от схемы, приведенной на рис. 75. Барабан Крослея (рис. 76) имеет также пять камер, но входные и выходные щели четырех измерительных камер расположены на торцевых стенках барабана. Пятая камера, объединяющая впускные щели, также расположена на торце барабана.

Точность измерения газовыми часами зависит помимо других причин от постоянства уровня жидкости в кожухе прибора, поэтому газовые часы обязательно снабжаются приспособлениями для поддержания постоянного уровня запорной жидкости.

На рис. 77 изображен внешний вид мокрых газовых часов с барабаном Крослея большой производительности.

Газовые часы включаются в газовую линию с возможностью их выключения. Газовые часы снабжаются обычно диференциаль-

ным манометром, измеряющим перепад давления между входным и выходным газопроводом, а также манометрами на входе и выходе газа. Корпус газомера должен иметь кран для спуска жидкости и люк у дна для чистки газомера. Газомеры больших производительностей имеют у дна кожуха специальный карман-грязеуловитель.

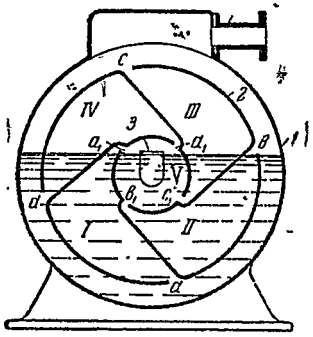


Рис. 75. Схема мокрых газовых часов:

1 — кожух; *2* — барабан; *3* — подающая труба; *4* — отводящая труба; *I*, *II*, *III*, *IV*, *V* — камеры барабана; *a*, *b*, *c*, *d* — наружные щели; a_1, b_1, c_1, d_1 — внутренние щели.

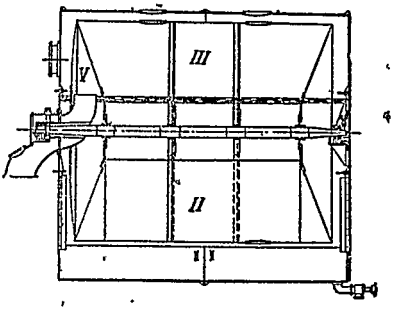


Рис. 76. Барабан Крослея:

II и *III* — измерительные камеры; *V* — распределительная камера.

Барабан газовых часов для точности измерения не должен делать более 100—120 об/час при емкости барабана до 15 $м^3$; 80—90 об/час при емкости до 30 $м^3$ и 70—80 об/час при больших емкостях.

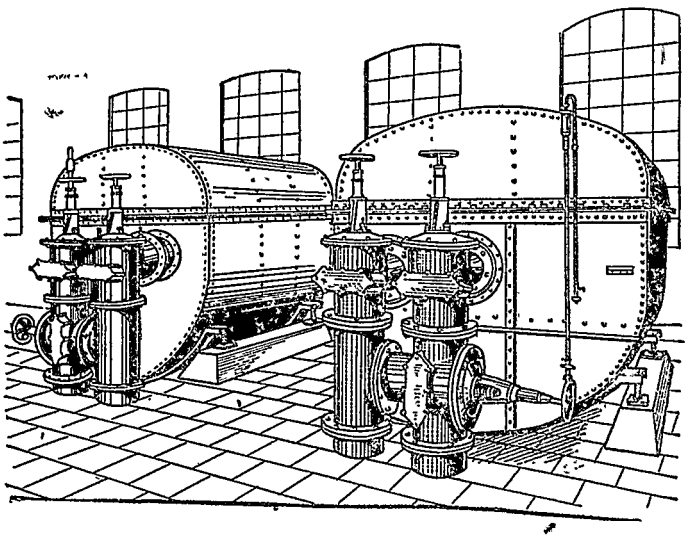


Рис. 77. Мокрые газовые часы с барабаном Крослея.

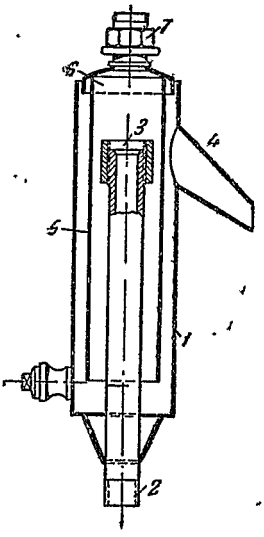


Рис. 78. Перелив Кинга:

1 — цилиндрический сосуд; *2* — сливная трубка; *3* — винтовая муфта; *4* — перелив; *5* — колпак сливной трубки; *6* — крышка; *7* — соединительный штуцер.

Запорной жидкостью обычно служит вода. В случае опасности замерзания применяют водный раствор хлористого магния или глицерина. Иногда воду заменяют глицерином, трансформаторным маслом или специальным маслом для газовых часов, однако такая замена увеличивает потерю давления в газомере и удорожает эксплоатацию.

Мокрые газовые часы применяются для измерения нейтральных или слабоактивных газов: светильного, газогенераторного, коксового и других, заметно не растворяющихся в запорной жидкости и не действующих на материал газомера.

На рис. 78 изображено приспособление для поддержания постоянного уровня, перелив Кинга. Он состоит из цилиндрического сосуда *1*, соединяющегося через штуцер *7* с газовым пространством газомера. По оси сосуда расположена выходящая из сосуда через дно труба *2*, имеющая на верхнем конце винтовую муфту *3* для точной установки высоты уровня в газомере. Трубка *2* покрыта колпаком *5*, прикрепленным к крышке сосуда *6*. В верхней части боковой стенки сосуда *1* имеется перелив *4*. Труба *2* соединена с жидкостным пространством газомера и одновременно с трубой, подающей жидкость в газомер. Излишняя жидкость, переливаясь через край муфты *3*, образует гидравлический затвор в сосуде *1*, высота которого определяется положением муфты *3*.

Газовые часы изготовляются на производительность от 30 до 10 000 *м³/час*.

В СССР изготовляются мокрые газовые часы лабораторного типа емкостью барабана 5 *л* и часовой производительностью 0,5 *м³*.

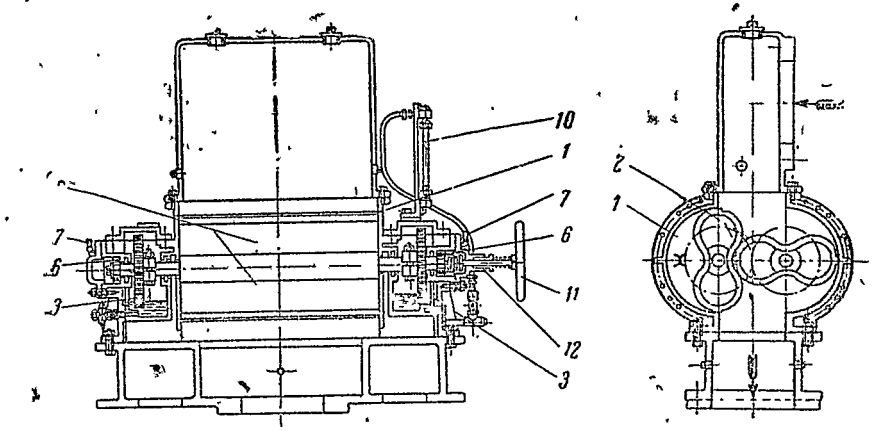


Рис. 79. Ротационный газомер:

1 — чугунный кожух; *2* — поршни; *3* — шестерни; *6* — подшипники; *7* — масленки; *10* — манометр; *11* — пусковой маховик; *12* — сальник.

Ротационный газомер. Ротационный газомер (рис. 79) устроен аналогично ротационным насосам для жидкостей и состоит из чугунного кожуха *1*, внутри которого вращаются на двух параллельных горизонтальных валах поршни *2*. Валы поршней связаны снаружи кожуха зубчатыми колесами *3*. От одного из валов вращение поршней передается счетному механизму, который может быть снабжен регистрирующим прибором. Шариковые или роликовые подшипники *6* валов, а также зубчатое зацепление *3* работают в масляных ваннах и заключены в газонепроницаемые картеры. Тонкий валик, соединяющий вал поршня с счетным механизмом, проходит через сальник в стенке картера, создавая незначительное трение, не отзывающееся на точности измерений. Величина перепада давления измеряется диференциальным манометром *10*.

Погрешность измерений составляет ± 2% при нагрузке от 10 до 100% нормальной. При меньших нагрузках погрешность увеличивается вследствие большей относительной утечки через зазоры поршней. Газомер допускает кратковременную перегрузку до 30% от нормальной.

Газомеры изготовляются низкого давления до 1 *кг/см²* с производительностью 200—2400 *м³/час* и высокого давления до 10 *кг/см²* с производительностью 200—15 000 *м³/час*. Последние отличаются более массивным корпусом, обеспечивающим необходимую прочность.

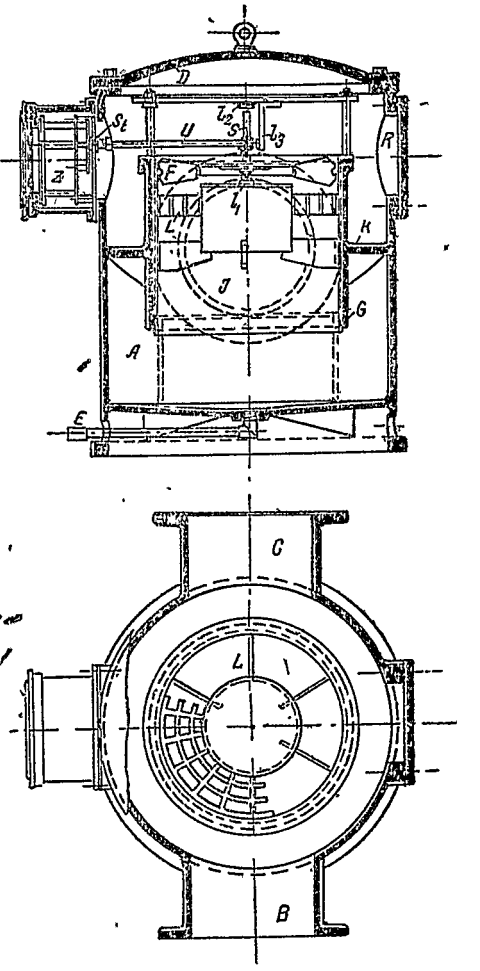


Рис. 80. Скоростной крыльчатый газомер:

A — кожух газомера; *B* — входной штуцер; *C* — выходной штуцер; *G* — концентричный стакан; *K* — перегородка; *F* — крыльчатое колесо; *S* — ось колеса; l_1, l_2 — игольчатые опоры оси; *U* — ось счетчика; *Z* — счетчик; *L* — струевыпрямитель.

Скоростной крыльчатый газомер. Крыльчатый газомер основан на принципе крыльчатого колеса анемометра, увеличенного до размеров, позволяющих пропустить через колесо весь поток газа. Газомер (рис. 80) состоит из цилиндрического кожуха *A*, снабженного входным и выходным штуцерами *B* и *C*. Внутри кожуха

помещается концентричный стакан G и наклонная перегородка K, соединяющая входной патрубок с нижним отверстием стакана, а выходной патрубок с верхним. В верхней части стакана помещено крыльчатое колесо F, вращающееся с малым трением на вертикальной оси S, имеющей игольчатые опоры l_1 и l_2. На оси нарезан червяк, сцепляющийся с червячным колесом, сидящим на горизонтальной оси U, которая передает вращение крыльчатки счетному механизму Z.

Поток газа направляется на крыльчатое колесо через струевыпрямитель L. При загрязненном газе под струевыпрямителем устанавливается фильтрующее сито, очищающее поток от грубых механических примесей.

Крыльчатые газомеры строятся для расходов 20—20 000 *м*³/*час*. Погрешность их при чистом газе составляет $\pm$ 2 до $\pm$ 3%, при загрязненном газе $\pm$ 4 до $\pm$ 5%. Минимальный расход, измеряемый с этой точностью, составляет $^1/_5$—$^1/_8$ нормального расхода.

Преимущества крыльчатых газомеров заключаются в компактности прибора, требующего в десять раз меньшей площади, чем мокрые газовые часы, и длительности работы при сохранении первоначальной точности.

Крыльчатые газомеры могут быть приспособлены к измерению газа под давлением до 10 *кг*/*см*².

ГЛАВА V

ДРОССЕЛИРУЮЩИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

22. Теоретические основы измерения расхода дросселированием

Гидродинамический метод с применением так называемых дросселирующих расходомеров является наиболее распространенным методом измерения расхода жидкостей, паров и газов. Этот особый метод измерения потока осуществляется приборами, создающими сжатие струи (дросселирующие приборы).

Дросселирование струи может быть выполнено различными способами, основанными на общем принципе, с помощью устройства в трубопроводе местного сужения сечения трубопровода. В измерительной технике используются дросселирующие устройства следующих трех видов.

Острая диафрагма (рис. 81, *а*), представляющая собой тонкий диск с центральным круглым отверстием, вставленный в трубопровод так, чтобы отверстие диска было концентрично стенкам трубопровода.

Сопло (рис. 81, *b*), представляющее собой короткую насадку параболической формы, вставляющуюся концентрично в трубопровод.

Труба Вентури (рис. 81, *с*), состоящая из сужающейся насадки в виде сопла, соединяющейся с коническим расширяющимся патрубком (диффузором).

Из этих трех устройств наибольшим распространением пользуется острая диафрагма, свойства которой изучены наиболее полно.

Представим себе, что в цилиндрическом трубопроводе, имеющем в одном месте сужение (рис. 82), течет поток несжимаемой жидкости.

Обозначим:

f_1, f_2, f_3 — соответственно сечение трубы, отверстия диафрагмы и суженного места струи в $м^2$;

p_1, p_2, p_3 — давление жидкости в сечениях потока $кг/см^2$;

w_1, w_2, w_3 — скорости жидкости в сечениях потока $м/сек$;

γ — плотность жидкости в $кг/м^3$.

Для условия неразрывности струи должно быть действительно соотношение:

$$f_1 w_1 = f_2 w_2 = f_3 w_3, \tag{67}$$

отсюда

$$\frac{f_2}{f_1} = \frac{w_1}{w_2} \quad \text{и} \quad \frac{f_3}{f_2} = \frac{w_2}{w_3}.$$

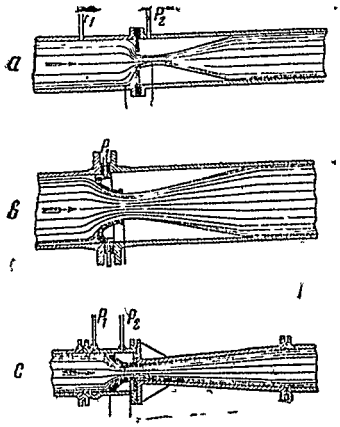


Рис. 81. Типы дроссельных приборов:
a — острая диафрагма; *b*—сопло; *c* — труба Вентури.

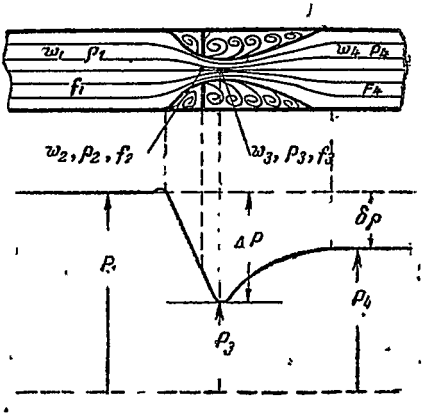


Рис. 82. Схема дросселирования.

Назовем $\frac{f_2}{f_1}$ коэфициентом диафрагмы и $\frac{f_3}{f_2}$ коэфициентом сжатия струи и обозначим их, соответственно, φ и μ. Тогда:

$$\frac{w_1}{w_2}=\varphi \text{ и } \frac{w_2}{w_3}=\mu . \tag{68}$$

Из этих отношений находим:

$$w_1=\varphi w_2 \text{ и } w_2=\mu w_3 . \tag{69}$$

$$w_1=\varphi \eta w_3 . \tag{70}$$

Уравнение Бернулли при горизонтальном трубопроводе для сечений f_1 и f_3 будет:

$$\frac{p_1}{\gamma}+\frac{w_1^2}{2g}=\frac{p_3}{\gamma}+\frac{w_3^2}{2g}, \tag{71}$$

где g — ускорение силы тяжести, равное 9,81 *м/сек*².
Отсюда

$$\frac{p_1-p_3}{\gamma}=\frac{w_3^2-w_1^2}{2g} . \tag{72}$$

Подставляя в это уравнение значение w_1 из уравнения (70), получим:

$$\frac{p_1-p_3}{\gamma}=\frac{w_3^2(1-\varphi^2\mu^2)}{2g} . \tag{73}$$

Решая уравнение (73) относительно w_3, находим:

$$w_3=\frac{1}{\sqrt{1-\varphi^2\mu^2}}\sqrt{\frac{2g}{\gamma}(p_1-p_3)} \text{ м/сек.} \tag{74}$$

Зная, что $f_3 = \mu f_2$, найдем секундный расход:

$$Q = w_3 f_3 = \frac{\mu}{\sqrt{1-\varphi^2\mu^2}} f_2 \sqrt{\frac{2g}{\gamma}(p_1 - p_3)} \; м^3/сек. \qquad (75)$$

Весовой секундный расход получим, умножив объемный расход на плотность жидкости:

$$G = Q\gamma = \frac{\mu}{\sqrt{1-\varphi^2\mu^2}} f_2 \sqrt{2g\gamma(p_1 - p_3)} \; т/сек. \qquad (76)$$

Множитель $\frac{\mu}{\sqrt{1-\varphi^2\mu^2}}$ для каждого данного прибора есть постоянная величина, называемая коэфициентом расхода, обозначаемым обычно буквой α. Разность давлений $p_1 - p_3$ можно обозначить Δp, так как при измерении диференциальными манометрами непосредственно получается величина разности давлений; затем $\sqrt{2g} = 4{,}43$. Введя все эти обозначения в уравнение (75), получим окончательно:

$$Q = 4{,}43\, \alpha f_2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma}}. \qquad (77)$$

Но $\frac{\Delta p}{\gamma} = H$, выраженной в метрах столба измеряемой жидкости; поэтому уравнение (77) может быть представлено в виде:

$$Q = 4{,}43\, \alpha f_2 \sqrt{H} \; м^3/сек. \qquad (78)$$

Уравнения (75—78) представляют собой выражения для теоретического расхода жидкости через диафрагму. Действительная величина расхода будет меньше, так как часть энергии струи теряется на трение, завихрения и т. п. Поэтому в уравнения расхода необходимо ввести поправку в виде коэфициента прибора η, тогда действительный расход выразится:

$$Q = 4{,}43 \eta\alpha f_2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma}} = 4{,}43\, \eta\alpha f_2 \sqrt{H} \; м^3/сек. \qquad (79)$$

$$G = 4{,}43\, \eta\alpha f_2 \sqrt{\Delta p \gamma} = 4{,}43\, \eta\alpha f_2 \gamma \sqrt{H} \; т/сек. \qquad (80)$$

Величина $4{,}43\, \eta\alpha f_2$ постоянна для каждого прибора и может быть обозначена как некоторый постоянный коэфициент K. Тогда уравнения (79) и (80) примут весьма простой вид:

$$Q = K\sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma}} = K\sqrt{H} \; м^3/сек. \qquad (81)$$

$$G = K\sqrt{\Delta p \gamma} = K\gamma\sqrt{H} \; т/сек. \qquad (82)$$

Из последних уравнений видно, что измерение расхода сводится к измерению перепада давления потока между давлением перед сужением и давлением в наиболее суженном сечении струи.

Из уравнения (81) также следует, что физическое значение коэфициента K есть секундный расход через сужение ($м^3/сек$) при перепаде давления, равном 1 $м$ столба измеряемой жидкости.

Вышеприведенные формулы относятся к случаю применения острых диафрагм. Для трубы Вентури формулы остаются в силе с некоторым упрощением выражения для коэфициента расхода α, так как для нее наиболее

суженная часть струи совпадает с ее отверстием, поэтому из выражения для коэфициента ε выпадает коэфициент сжатия струи μ и выражение для α приобретает вид:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1-\varphi^2}}. \tag{83}$$

Измерение расхода газа. Основным уравнением скорости газа при истечении из отверстия будет:

$$w = \sqrt{2gH}, \tag{84}$$

где w — скорость истечения газа в $м/сек$;
g — ускорение силы тяжести в $м/сек^2$;
H — перепад давления в $м$ газ. ст.

Чтобы выразить высоту газового столба в высоте водяного столба, можно воспользоваться соотношением:

$$H_г \gamma_г = H_в \gamma_в,$$

откуда

$$H_г = \frac{H_в \gamma_в}{\gamma_г} = \frac{H_в \gamma_в}{\gamma \delta}, \tag{85}$$

где $H_г$ — высота газового столба в $м$;
$H_в$ — высота водяного столба в $м$;
$\gamma_в$ — плотность воды в $кг/м^3$;
$\gamma_г$ — плотность газа в $кг/м^3$;
γ — плотность воздуха в $кг/м^3$ при температуре и давлении измеряемого газа;
δ — удельный вес газа по воздуху.

Подставляя значение $H_г$ из уравнения (85) в уравнение (84), получим:

$$w = \sqrt{\frac{2g H_в \gamma_в}{\gamma \delta}}\ м/сек. \tag{86}$$

Объем газа будет равен:

$$Q = fw = f\sqrt{\frac{2g H_в \gamma_в}{\gamma \delta}} = 4{,}43 f \sqrt{\frac{H_в \gamma_в}{\gamma \delta}}\ м^3/сек, \tag{87}$$

где f — площадь сечения отверстия в $м^2$.

Приведем плотность воздуха γ к нормальным условиям, т. е. температуре 273° К и $p = 10\,000\ кг/м^2$.

Из соотношения:

$$\frac{\gamma}{\gamma_н} = \frac{p}{10\,000} \cdot \frac{273}{T}, \tag{88}$$

где $\gamma_н = 1{,}293\ кг/м^3$ — плотность воздуха при 0° С и давлении 1 $кг/см^2$;
p — давление газа в $кг/м^2$;
T — абсолютная температура газа в ° К,

находим:

$$\gamma = \frac{1{,}293 \cdot 273 \cdot p}{10\,000 \cdot T}\ кг/м^3. \tag{89}$$

Подставляя значение γ в уравнение (87), получим:

$$Q = 4{,}43\, f \sqrt{\frac{10\,000 \cdot H_в \cdot 1}{1{,}293 \cdot 273 \delta p}} \quad м^3/сек. \tag{90}$$

Это уравнение выражает фактический объем газа, протекающего при абсолютном давлении p и абсолютной температуре T.

Необходимо привести объем газа к нормальным условиям, так как расчет ведется на газ при $T = 273°$ К и давлении, равном 10 000 $кг/м^2$. Для этого напишем соотношение:

$$\frac{Q_н}{Q} = \frac{p}{10\,000} \cdot \frac{273}{T}, \tag{91}$$

откуда:

$$Q_н = Q \frac{p \cdot 273}{10\,000 \cdot T}. \tag{92}$$

Подставив это значение в уравнение (90), будем иметь:

$$Q_н = 4{,}43\, f \sqrt{\frac{10\,000 \cdot H_в \cdot 1 \cdot p^2 \cdot 273^2}{1{,}293 \cdot 273 \cdot \delta \cdot p \cdot 10\,000 \cdot T^2}} =$$

$$= 0{,}001232\, f \sqrt{\frac{hp}{\delta} \cdot \frac{273}{T}} \quad м^3/сек, \tag{93}$$

где h — перепад давления в $мм$ вод. ст.

Введя в эту формулу коэфициент расхода диафрагмы α и коэфициент прибора η, получим окончательно:

$$Q = 0{,}001232\, \eta\, \alpha\, f \sqrt{hp} \cdot \sqrt{\frac{273}{\delta T}}. \tag{94}$$

Таким образом, для измерения расхода газа кроме перепада давления необходимо измерять абсолютное давление газа в трубопроводе и абсолютную температуру газа.

Уравнение (94) можно написать так:

$$Q = K_1 \sqrt{hp} \cdot \sqrt{\frac{273}{\delta T}} \quad м^3/сек, \tag{95}$$

обозначив: $K_1 = 0{,}001232\, \alpha\, \eta\, f$.

Заводы, выпускающие дроссельные расходомеры для газа, дают коэфициент прибора K_1 при $\delta = 1{,}0$ и $T = 273°$ К, а также таблицы поправок на удельный вес и температуру.

Измерение расхода пара. Вышеприведенные формулы для определения расхода газа пригодны лишь в том случае, если перепад давления $h = \Delta p$ мал по сравнению с абсолютным давлением p. В этом случае можно пренебречь изменением термодинамического состояния вещества при протекании через дросселирующее отверстие.

Изменение состояния заключается в расширении газа или пара в области пониженного давления и в понижении температуры газа или пара при адиабатическом расширении.

Чтобы получить расчетную формулу для пара и газа при значительных перепадах, необходимо в формулу (77) для несжимаемых жидкостей ввести поправочный коэфициент ε, учитывающий изменение термодинамического состояния.

Для этого в уравнении (76) радикал $\sqrt{p_1 - p_3}$ преобразовывается следующим образом:

$$\sqrt{p_1 - p_3} = \sqrt{\frac{p_1 - p_3}{p_1}} \cdot \sqrt{p_1} = \varepsilon \sqrt{p_1}. \qquad (96)$$

При адиабатическом расширении:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{p_1 - p_3}{p_1}} = \sqrt{\frac{k}{k-1}} \cdot \left(\frac{p_3}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{1 - \left(\frac{p_3}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}}, \qquad (97)$$

где k — показатель адиабаты, $\frac{c_p}{c_v}$.

При изотермическом расширении:

$$\varepsilon = \frac{p_3}{p_1} \sqrt{\ln \frac{p_1}{p_3}}. \qquad (98)$$

Формула расхода с введением коэфициента ε примет вид:

$$Q = 4{,}43\, \eta\, \alpha\, \varepsilon f_2 \sqrt{\frac{p_1}{\gamma_1}}\ м^3/сек, \qquad (99)$$

где $\alpha = \frac{\mu}{\sqrt{1 - \varphi^2 \mu^2}}$ — коэфициент расхода;

ε — термодинамический коэфициент, найденный по уравнению (97);

f_2 — сечение отверстия диафрагмы в $м^2$;

p_1 — давление газа или пара до диафрагмы в $кг/см^2$.

Вес пара определяется по уравнению:

$$G = 4{,}43\, \eta\, \alpha\, \varepsilon f_2 \sqrt{p_1\, \gamma_1}\ кг/сек. \qquad (100)$$

Иногда удобнее вместо давления пара пользоваться перепадом давления, что можно сделать, применяя те же формулы, заменяя в них ε на ε_1, а p_1 на Δ_p:

$$Q = 4{,}43\, \eta\, \alpha\, \varepsilon_1 f_2 \sqrt{\frac{\Delta p}{\gamma_1}}\ м^3/сек. \qquad (101)$$

$$G = 4{,}43\, \eta\, \alpha\, \varepsilon_1 f_2 \sqrt{\Delta p\, \gamma_1}\ кг/сек. \qquad (102)$$

Значение коэфициента ε_1 в зависимости от отношения $\frac{\Delta p}{p}$ приведено в диаграмме на рис. 83.

23. Дроссельные устройства

Острая диафрагма. Из дроссельных устройств наибольшим распространением, как уже было указано, пользуется острая диафрагма, применяемая для измерения расхода жидкостей, газов и паров.

Острая диафрагма представляет собой тонкий диск с круглым концентрическим отверстием. Отверстие имеет со стороны входа жидкости острую цилиндрическую кромку, а далее расточено на конус под углом 45°. Для точной работы диафрагм

необходима строгая концентричность отверстия диафрагмы со стенками трубопровода, строгое соответствие размера отверстия с расчетной величиной при допуске не свыше ± 0,01—0,02 *мм* и безукоризненная острота входной кромки диафрагмы без закруглений, вмятин и заусенец. Кромка диафрагм с диаметром отверстия меньше 150 *мм* не должна даже зачищаться шкуркой: кромка должна быть получена прямо из-под резца без заусенец и рванин.

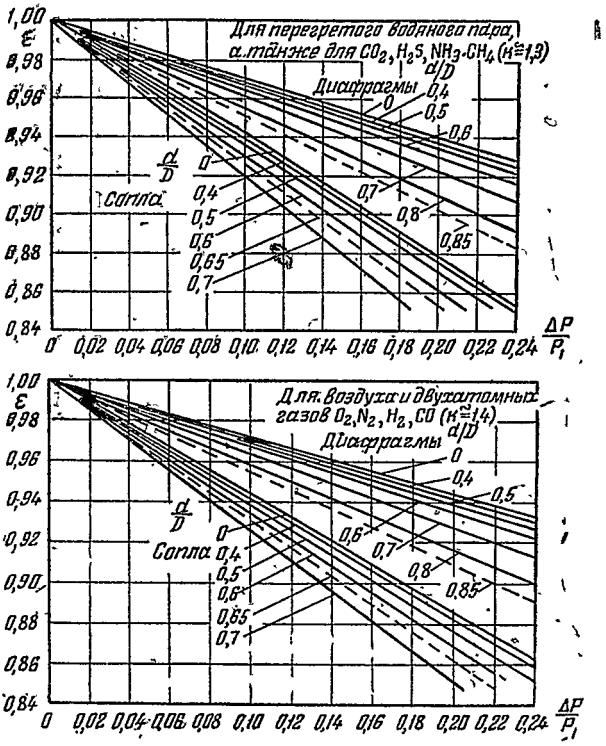


Рис. 83. Кривые значений ε.

Из других размеров диафрагмы важное значение имеет ширина кольцевой щели для отбора давлений. Ширина кольцевой щели должна быть меньше 0,03 *D*, но во всяком случае не больше 5 *мм* и не меньше 1 *мм*.

Диафрагмы можно изготовлять из любых материалов, при выборе которых следует учитывать свойства среды. Разъедание острой кромки диафрагмы резко изменяет коэфициент расхода α, и измерения теряют всякую цену.

Поэтому необходимо для рабочей части диафрагмы выбирать материал, вполне устойчивый химически к данной среде и достаточно твердый, т. е. устойчивый к механическому износу. Наиболее подходящими материалами являются: высокохромистая сталь

марок Ж17 и Ж27, хромоникелевая сталь типа 18/8, монельметалл, эбонит, стекло.

Преимущество диафрагм заключается в точно установленном значении коэфициента расхода α в пределах отношений $\frac{d}{D}$ от 0,2 до 0,8 и в постоянстве этого коэфициента расхода для чисел Рейнольдса — $Re > 170\,000$.

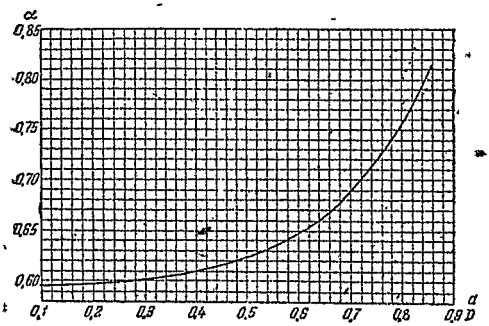


Рис. 84. Коэфициенты расхода α для острых диафрагм.

Коэфициент расхода α для острых диафрагм можно брать по диаграмме на рис. 84, где значения α даны в зависимости от отношения $\frac{d}{D}$. Эти коэфициенты расхода действительны для трубопроводов с гладкими стенками и тщательно выполненной диафрагмы.

Для шероховатых труб, заржавленных внутри, коэфициент расхода увеличивается и к значению коэфициента α по диаграмме на рис. 84 необходимо вводить поправку, величина которой принимается в зависимости от диаметра трубопровода D и отношения $\frac{d}{D}$ по табл. 3.

Таблица 3

Поправки к коэфициентам расхода для шероховатых труб

Отношение диаметров	Диаметр трубопровода	
	$50 \leqslant D \leqslant 200$ *мм*	$200 \leqslant D \leqslant 300$
	Поправка в %	
$0{,}40 < \frac{d}{D} \leqslant 0{,}45$	+ 0,5	0
$0{,}45 < \frac{d}{D} \leqslant 0{,}55$	+ 0,5	+ 0,5
$0{,}55 < \frac{d}{D} \leqslant 0{,}70$	+ 1,0	+ 0,5
$0{,}70 < \frac{d}{D} \leqslant 0{,}80$	+ 1,5	+ 1,0

При $D > 300$ *мм* или $\frac{d}{D} < 0{,}4$ влияние шероховатости стенок трубопровода становится неощутимым.

Для $D < 50$ *мм* шероховатость труб настолько сильно влияет на значение α, что требует специальной градуировки диафрагмы в рабочих условиях.

Если входная кромка диафрагмы слегка закруглена или скошена, что заметно по отблеску при рассматривании на свет, то коэфициент расхода α также увеличивается. Необходимые поправки на неполную остроту кромки приведены в табл. 4.

Таблица 4

Поправки на неполную остроту кромки диафрагмы

Диаметр отверстия диафрагмы d в *мм*	Поправка в %
$60 < d \leqslant 100$	+0,5
$40 < d \leqslant 60$	+1,0
$20 < d \leqslant 40$	+1,5
$10 < d \leqslant 20$	+2,0

При значениях $d > 100$ *мм* поправка на затупление кромки отпадает; при очень малых $d < 10$ *мм* диафрагма требует специальной градуировки.

Как сказано выше, α остается постоянным при значениях $Re > 170\,000$ независимо от протекающей среды, ее параметров, скорости и расхода. При меньших значениях Re может сказаться влияние вязкости среды и в этом случае необходимо вводить поправку на значение α. Величины этих поправок в % приведены на диаграмме, изображенной на рис. 85. Указанные на ней величины поправок с округлением до 0,5% относятся к областям, ограниченным двумя смежными кривыми. Например, при $Re = 24\,000$ и $\frac{d}{D} = 0{,}57$ поправка будет +1,0% (пунктирные линии на диаграмме). Крайняя правая кривая на диаграмме граница допуска определяет предельные значения чисел Рейнольдса, выше которых α остается постоянным.

Все сказанное относится к случаю установки диафрагмы в середине участка трубопровода. Особыми случаями являются установка диафрагмы на конце трубопровода или в его начале.

Значения коэфициентов расхода диафрагмы α при ее установке на выходе из трубопровода представлены на диаграмме (рис. 86), на которой указаны также предельные значения чисел Рейнольдса, выше которых α будет постоянным.

В случае установки диафрагмы на входе в трубопровод α не зависит, естественно, от отношения $\frac{d}{D}$ и его значение равно $\alpha = 0{,}60$ при $Re > 55\,000$.

Поправка на расширение газа или пара для диафрагм может быть взята по диаграммам рис. 83 или вычислена по формуле:

$$\varepsilon = 1 - \left(0{,}40 + 0{,}46 \frac{d^4}{D^4}\right) \frac{\Delta p}{p_1 k}, \qquad (103)$$

где Δp и p измеряются в одних и тех же единицах (например, в *кг/м*^{2});

k — показатель адиабаты протекающего газа или пара.

Диафрагмы при правильном изготовлении и установке дают высокую точность измерений, величина погрешности может быть доведена от $\pm$ 0,5 до $\pm$1,0% измеряемой величины.

При расчете диафрагмы необходимо придерживаться следующего. Потерю напора в диафрагме (δp) желательно иметь возможно ниже, поэтому отношение $\frac{d}{D}$ следует выбирать возможно большим, не переходя, однако, величины 0,8. Перепад давления Δp в диафрагме не должен быть чрезмерно малым, так как это затрудняет измерение расхода и уменьшает его точность. Кроме того, значение Δp должно соответствовать одному из стандартных перепадов, на которые строятся измерительные приборы (дифференциальные манометры от 41 до 1020 *мм* рт. ст.; кольцевые весы от 36 до 200 *мм* рт. ст.).

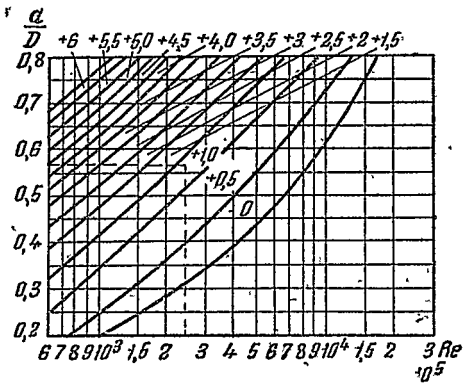


Рис. 85. Поправки к коэфициенту расхода острой диафрагмы.

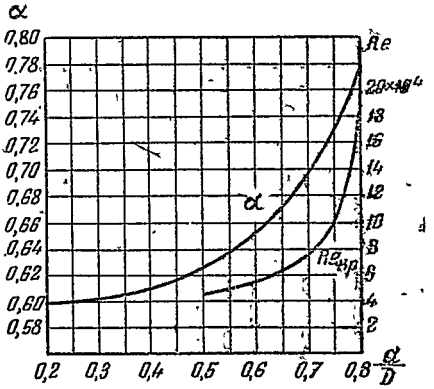


Рис. 86. Коэфициенты расхода α острой диафрагмы на конце трубопровода.

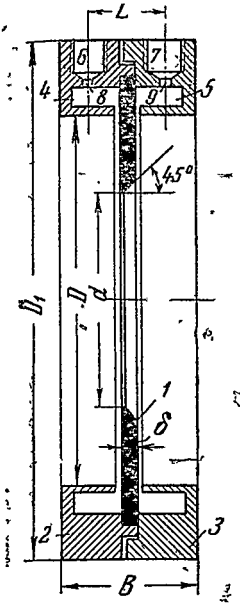
При измерении расхода газа перепад давления не должен превышать 25% абсолютного давления перед диафрагмой, так как для отношений $\frac{\Delta p}{p} > 0{,}25$ не имеется точных поправок на расширение (ε).

Наибольшую точность измерений обеспечивают камерные диафрагмы, выполняемые в нескольких конструктивных вариантах. Конструкция камерной диафрагмы завода «Гизприбор» представлена на рис. 87. Камерная диафрагма состоит из трех деталей: собственно диафрагмы *1* и двух колец *2* и *3*, между которыми зажимается диафрагма. Собранная диафрагма вставляется между фланцами трубопровода на прокладках и затягивается фланцевыми болтами.

Фигурный профиль колец образует в собранной диафрагме два кольцевых канала (камеры) *4* и *5*, открывающихся внутрь трубопровода узкими кольцевыми щелями у обеих поверхностей диска диафрагмы. Кольца снабжены каждое одним нарезным отверстием *6* и *7* для присоединения трубок, идущих к измерительному прибору. Отверстия *6* и *7* каналами малого диаметра *8* и *9* соединяются с передней и задней камерами диафрагмы.

Эта конструкция обеспечивает отбор давления, соответствующего действительной величине у поверхности диафрагмы, и исключает возможность засорения. Недостатком камерной диафрагмы является сравнительно большая толщина (55—60 *мм*), затрудняющая установку на действующий трубопровод.

Разновидностью камерной диафрагмы является диафрагма фирмы Гартман и Браун (рис. 88), отличающаяся тем, что у нее обе кольцевые камеры расположены с задней стороны диафрагмы. Такое расположение камер устраняет опасность появления уступа перед диафрагмой, часто образующегося при других конструкциях вследствие разности диаметров трубопровода и входного кольца диафрагмы или неточной центровки. Такой уступ сильно влияет на точность измерения диафрагмой. Уступ на тыловой части диафрагмы не оказывает влияния на измерение. Недостаток этой конструкции — сравнительно малый объем камер. Переток из одной камеры в другую не имеет места при тщательной обработке соприкасающихся поверхностей диафрагмы и камерного кольца; достаточная плотность достигается нажатием кольца на диафрагму при затягивании фланцев и не требует каких-либо прокладок.



Фиг. 87. Камерная диафрагма завода Тизприбор:

1 — диафрагма; *2* и *3* — кольца диафрагмы; *4* и *5* — кольцевые каналы; *6* и *7*—отверстия для присоединения дифференциального манометра; *8* и *9* — соединительные каналы.

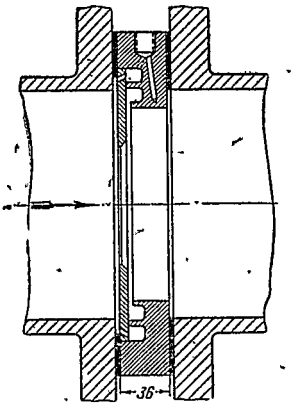


Рис. 88. Камерная диафрагма фирмы Гортман и Браун.

Для малых диаметров трубопровода той же фирмой предлагается диафрагма, изображенная на рис. 89. Она изготовляется вместе с входным и выходным участками гладкой калиброванной омедненной или никелированной трубы. Длина входного участка равна 8,5 *d*. В этой конструкции устранена всякая возможность попадания прокладки или образования какого-либо выступа. Вся конструкция ввальцовывается или присоединяется фланцами или муфтами в трубопровод. Недостатком является трудность осмотра, чистки или смены рабочей части.

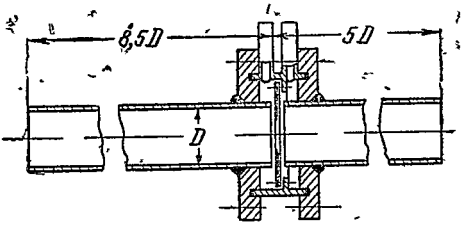


Рис. 89. Камерная диафрагма для малых трубопроводов.

Полукамерная диафрагма, изображенная в разрезе на рис. 90, состоит из одной детали и проще в изготовлении, чем камерная. Строительная толщина ее также значительно меньше (20—25 *мм*), надежность работы, т. е. устойчивость к засорению, у нее не меньшая, чем у камерной, однако вследствие отбора давления на некотором расстоянии от поверхности диафрагмы точность измерения несколько ниже.

Тонкая диафрагма, или диафрагма Ясинского (рис. 91), представляет собой простой диск с отверстием, зажимаемый между

фланцами трубопровода, что возможно во всех случаях без переделки трубопровода, так как строительная толщина диафрагмы составляет 5—6 *мм*.

Отбор давления в тонкой диафрагме производится через сверленые каналы, открывающиеся на лицевую и торцевую поверхность диафрагмы. Эти сверления выполняются в специальной вставке, вделываемой в диафрагму ласточкиным хвостом заподлицо с поверхностью диафрагмы. В утолщенной части вставки имеются два сверления, соединенные с каналами с нарезкой для ввинчивания соединительных труб.

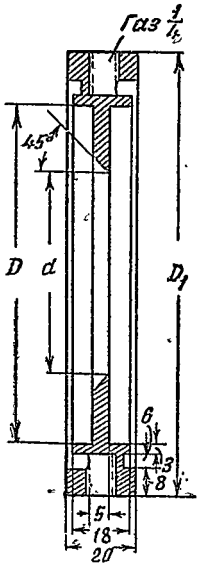


Рис. 90. Полукамерная диафрагма.

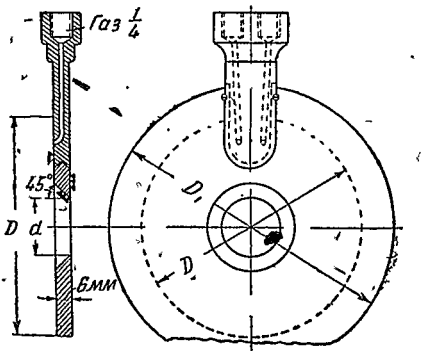


Рис. 91. Тонкая диафрагма.

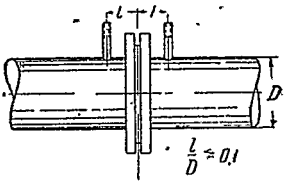


Рис. 92. Отъем давления через сверления в трубопроводе.

Тонкие диафрагмы применяются на трубопроводах больших диаметров, так как камерные и полукамерные диафрагмы строятся для труб диаметром от 50 до 350—400 *мм*.

Установка тонких диафрагм на трубах диаметром менее 400 *мм* допустима лишь на действующих трубопроводах, не допускающих по своему расположению установки камерных диафрагм.

Отъем давления у тонких диафрагм, кроме сверления в самой диафрагме, как изображено на рис. 91, может быть произведен через сверления в самом трубопроводе (рис. 92), однако необходимо, чтобы расстояние l между осями трубок и диафрагмой было минимальным (0,1 D и меньше), так как с увеличением расстояния погрешности измерения растут чрезвычайно быстро. На рис. 93 даны поправки к значениям α в зависимости от от-

ношений $\frac{d}{D}$ и $\frac{l}{D}$. Значения α необходимо умножать на коэффициент, найденный на оси ординат. Как видно из диаграммы, для значений $\frac{d}{D} < 0{,}6$ поправка очень мала и не превышает 1%.

Лицевая сторона тонкой диафрагмы и цилиндрическая часть отверстия обрабатываются под ▽▽▽ или полируются. Остальные части диафрагмы могут быть обработаны под ▽▽ или ▽. При обработке и полировке надо строго следить за сохранностью остроты входной кромки отверстия, не допуская ее закругления.

Цилиндрическая часть отверстия обрабатывается с допуском 0,0005—0,001 d, где d диаметр цилиндрической части отверстия диафрагмы. Для удобства монтажа и транспортировки к тонкой диафрагме крепится точечной сваркой, винтами или заклепками с потайными головками или пайкой ушко из пластинки с отверстием для троса. На пластинке выбиваются знаки + (плюс) с лицевой стороны и — (минус) с другой стороны, а также размеры диафрагмы.

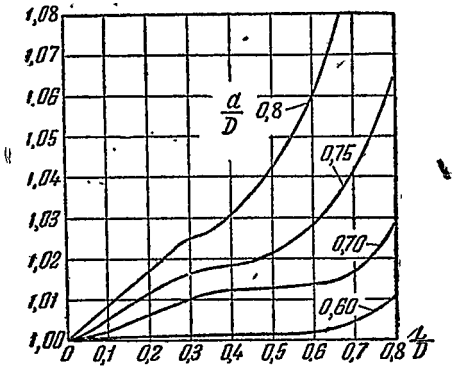


Рис. 93. Кривая погрешностей измерения при отъеме давления через сверления в трубопроводе.

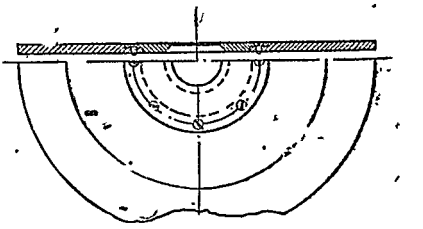


Рис. 94. Составная тонкая диафрагма.

При больших диаметрах трубопроводов и необходимости изготовления диафрагмы из ценного материала диафрагмы делаются составными. Наружное кольцо из обычного котельного железа, а рабочий диск из соответствующего материала (рис. 94).

В трубопроводах больших диаметров отъем давления через сверления в трубопроводе лучше всего делать четырьмя патрубками, расположенными по двум перпендикулярным диаметрам, соединенным кольцевым или квадратным коллектором, снабженным приспособлениями для продувки (при запыленных или смолистых газах) (рис. 95).

При необходимости измерения расхода на трубопроводе диаметром менее 50 *мм* изготовляется вставка из трубы диаметром 2", длиною 2—3 *м* с фланцем для помещения диафрагмы посредине длины вставки. Эта вставка вместе с диафрагмой встраивается в линию.

Диафрагмы вызывают значительную потерю давления, достигающую 0,1—0,2 *кг/см*². Потеря давления зависит от отношения

диаметра отверстия диафрагмы к диаметру трубы и может быть вычислена по формуле:

$$\frac{\delta p}{\Delta p} = 1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2, \qquad (104)$$

где δp — потеря давления в $кг/см^2$;
Δp — перепад давления в $кг/см^2$;
d — диаметр отверстия диафрагмы в $см$;
D — диаметр трубопровода в $см$.

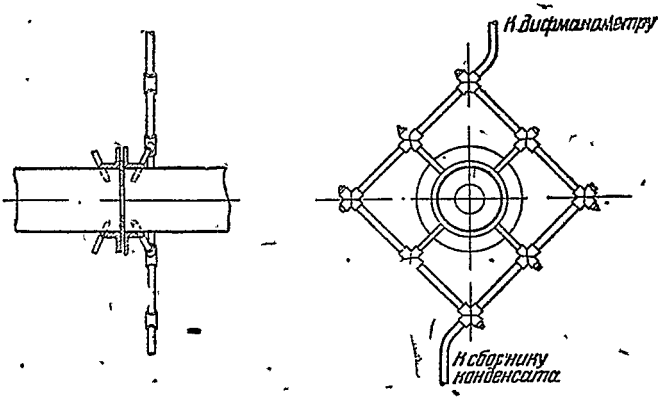


Рис. 95. Коллектор для отъема давления.

На рис. 96 представлены величины потерь давления для диафрагмы и нормализованного сопла.

Сопла. Наряду с диафрагмами в качестве дросселирующих устройств применяются сопла, особенно пригодные для измерения расхода в шероховатых трубопроводах. Основной формой сопла является так называемое нормальное сопло, стандартизованное международной федерацией комитетов по стандартизации в 1932 г.

Форма сопла и главные его размеры представлены на рис. 97. Профиль сопла образован двумя дугами. Вначале струя огибает дугу с радиусом 0,2 d, затем более пологую с радиусом 0,33 d и, наконец, переходит в сильно развитую цилиндрическую часть длиной 0,3 d.

Исследования показали, что наличие цилиндрической части достаточной длины обеспечивает однозначный и устойчивый поток и постоянство коэфициента расхода при различных скоростях, в особенности для газов.

При изготовлении сопла необходимо обращать внимание на максимальную гладкость входной части сопла и отсутствие конусности в его цилиндрической части. Очертания и обработка тыловой части сопла значения не имеют.

Уступ у выходного отверстия имеет целью предохранить кромку сопла от повреждений и его размеры не имеют значения.

На рисунке даны размеры сопла в зависимости от величины отверстия сопла d и диаметра трубопровода D. Расход нормального сопла вычисляется по общим формулам. Коэфициент расхода α принимается по кривой, изображенной на рис. 98, в зависимости от отношения $\frac{d}{D}$. Нормальные сопла в пределах отношений $0{,}2 < \frac{d}{D} < 0{,}7$ могут применяться без градуировки. Шероховатости трубопровода не влияют на работу сопел, если не достигают размеров больших наростов, резко искажающих поток.

Коэффициенты расхода нормальных сопел требуют поправки на расширение ε в случае измерения газов (рис. 83) и поправок при малых числах

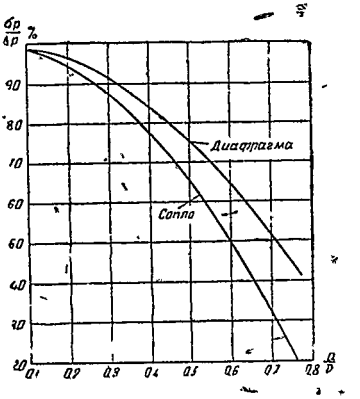


Рис. 96. Потери давления в острых диафрагмах и соплах.

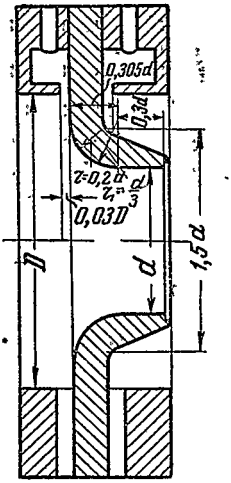


Рис. 97. Нормальное сопло 1932 г.

Рейнольдса (малый диаметр, малая скорость, большая вязкость). Поправка на число Рейнольдса принимается по диаграмме, изображенной на рис. 99. Крайняя правая кривая на этой диаграмме (граница допуска) дает определенные значения *Re*, выше которых влияние вязкости не сказывается и коэффициент расхода остается постоянным.

Следует избегать применения сопел при *Re* меньше предельного без градуировки прибора на месте. Число *Re* для сопел выше, чем для диафрагм, что сокращает область их применения.

Коэффициенты расхода (рис. 98) годны для диаметров трубопроводов в пределах $50 \leqq D \leqq 500$ При других диаметрах также необходима градуировка. Коэффициенты расхода, приведенные на рис. 98, относятся к установке сопел в середине линии трубопровода. При установке на выходе коэффициент α следует брать по диаграмме рис. 100 при условии, что значения *Re* выше предельных, указанных на диаграмме. При установке сопел на входе в трубопровод $\alpha = 0{,}99$ при всех значениях $Re > 55\,000$. При меньших *Re* коэффициент расхода в противоположность обычной установке сопел увеличивается.

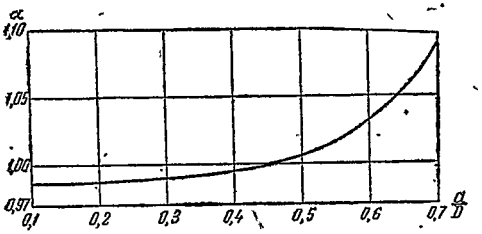


Рис. 98. Коэффициенты расхода нормального сопла.

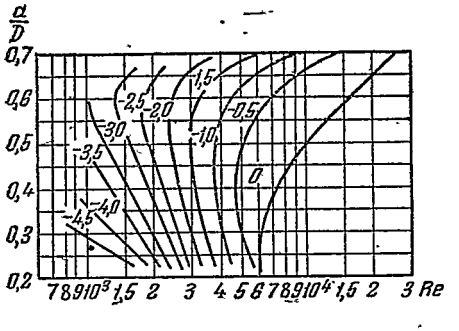


Рис. 99. Поправки коэффициента расхода нормального сопла.

Параболическое сопло. Характер профиля этого сопла резко отличается от нормального сопла. Длина цилиндрической части в параболическом сопле составляет 1—3 *мм* (рис. 101). Это вызывает изменение α в зависимости от *Re* даже в той области, где для нормальных сопел α остается постоянным.

Параболическое сопло рассчитано только для одного определенного отношения $\frac{d}{D} = 0{,}4$, поэтому при установке этого сопла перепад давления часто получается либо слишком малым, либо слишком большим. Значения α для параболического сопла в зависимости от *Re* даны на рис. 102. Поправка на расширение ε для данного сопла совпадает с нормальным соплом. Кроме указанных типов сопел существует ряд других типов, останавливаться на которых нет необходимости.

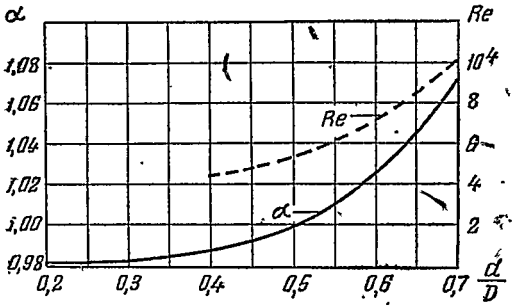


Рис 100. Коэфициенты расхода нормального сопла на конце трубопровода.

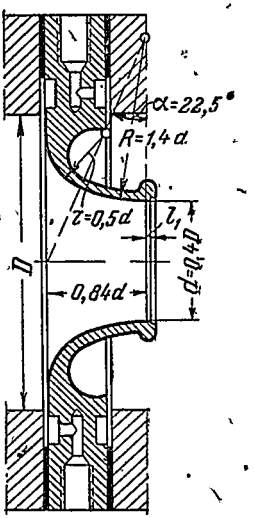


Рис. 101. Параболическое сопло:
$l_1 = 3$ *мм* при $D \leqq 1000$ *мм*;
$l_1 = 2$ *мм* при $D \leqq 500$ *мм*;
$l_1 = 1$ *мм* при $D \leqq 250$ *мм*.

При заказе сопел или при изготовлении их на месте следует предпочитать нормальную форму сопла (рис. 97). Необходимо предостеречь против применения сопел Бендемана (рис. 103) и ему подобных, типа толстой диафрагмы со скругленным профилем отверстия. Эти сопла, к сожалению, до сих пор применяются и изготовля-

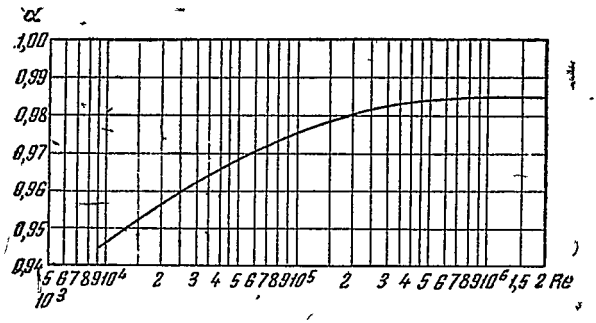


Рис. 102. Коэфициенты расхода параболического сопла.

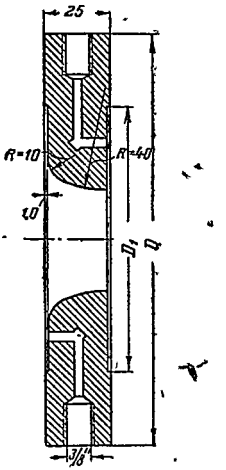


Рис. 103. Сопло Бендемана.

ются в разных местах, между тем их точность очень мала, а введение многочисленных поправок настолько усложняет подсчет, что сводит на-нет единственное кажущееся преимущество таких сопел — малую строительную толщину.

Трубы Вентури. Форма трубы Вентури до сих пор не стандартизована, поэтому различные фирмы в разных странах выпускают трубы Вентури самых разнообразных форм. Первоначальная форма трубы Вентури, предложенная Гершелем в 1887 г. и до сих пор широко применяемая в Англии и США, состоит из конической входной части с углом конуса около 21°, соединенной легким закруглением с короткой цилиндрической горловиной, переходящей в коническую выходную часть (диффузор) с углом расширения 5—7°.

Недостатки этой формы: зависимость коэфициента расхода от числа Рейнольдса и большая строительная длина. Длина прибора получается тем больше, чем меньше отношение $\frac{d}{D}$.

Труба Вентури фирмы Сименс-Гальске (рис. 104) состоит из двух частей *1* и *2*. В первую часть вставляется вкладыш *3* из монель-металла, имеющий слабо выпуклый профиль, приближающийся к конусу. Угол расширения диффузора принят в 8°.

Весьма большая строительная длина и огромный вес прибора, особенно при больших диаметрах трубопровода, а также отсутствие точно установленных коэфициентов расхода, требующее индивидуальной градуировки каждой трубы, сильно ограничивают область применения этого прибора.

Единственным достоинством трубы Вентури является очень малая потеря давления благодаря наличию диффузора, устраняющего вредные завихрения потока.

В последнее время предложены укороченные типы труб Вентури, состоящие из нормального сопла, переходящего в укороченный диффузор с увеличенным углом расширения. Диффузор обрабатывается, не доходя до полного диаметра трубопровода. Вследствие увеличенного угла раскрытия диффузора и уступа в его конце потери давления укороченных труб Вентури больше, чем нормальных типов

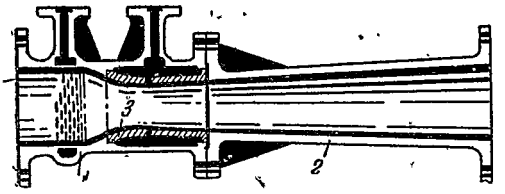


Рис. 104. Труба Вентури:
1 и *2* — кожух трубы; *3* — вкладыш.

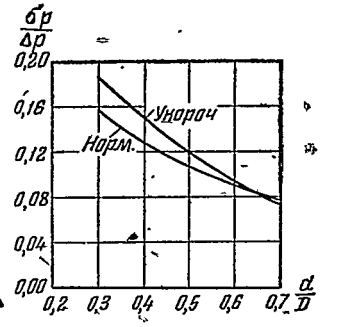


Рис. 105. Потери давления в трубе Вентури.

На рис. 105 показаны величины потерь давления для нормальных и укороченных труб Вентури.

24. Установка дроссельных приборов

При использовании для измерения потока дроссельных приборов в первую очередь необходимо учитывать характер протекающей среды, характер потока и наличие прямого участка трубопровода необходимой длины.

Надежное измерение расхода возможно лишь для однофазного состояния вещества, т. е. для газа или пара, не содержащего и не способного выделять влагу в условиях измерения, или для жидкости, не содержащей взвешенных твердых веществ и не выделяющей газа.

По характеру поток не должен иметь резких колебаний расхода или пульсации.

При необходимости измерять расход пара или газа на линии, подводящей или отводящей их к поршневым машинам, необходимо включать промежуточные емкости или длинные трубопроводы, способные сгладить пульсации потока. То же относится к измерению расхода жидкости, подаваемой поршневым насосом.

При измерении расхода жидкости поток должен занимать все сечение трубопровода, поэтому в случае установки дроссельного прибора на выходе трубопровода следует делать снижение, аналогично показанному на рис. 73. Во избежание подсоса воздуха давление у дроссельного прибора не должно падать ниже атмосферного даже при максимальном перепаде. Поэтому целесообразно у слива за дросселем устанавливать кран или задвижку для создания некоторого подпора.

Основным условием точности измерений будет наличие достаточного прямого участка трубопровода перед и за дроссельным прибором.

Длина прямых участков зависит от характера местных сопротивлений на трубопроводе, искажающих поток. На рис. 106 приведены длины прямых участков для диафрагм и нормальных сопел в зависимости от конфигурации трубопровода и наличия местных сопротивлений и отношения $m = \left(\frac{d}{D}\right)^2$. Наиболее опасными случаями будет постановка дроссельного прибора после вентиля или после двойного или многократного изгиба в разных плоскостях, вызывающего винтовое движение потока. В последнем случае полезно применить так называемый струевыпрямитель (успокоитель потока), одна из конструкций которого приведена на рис. 107.

Дифференциальные расходомеры к дроссельным приборам. Из теории измерения расхода дросселированием струи вытекает необходимость измерения разности давлений, создаваемой дросселирующим прибором. Таким образом, измерительное устройство состоит из двух связанных между собою частей: дроссельного прибора, создающего разность давлений, и собственно расходомера, измеряющего полученную разность давлений и превращающего эту разность в величину расхода.

Приборы, измеряющие разность давлений — дифференциальные манометры, были описаны во II главе (стр. 34 и 54), и здесь рассматриваются лишь специальные типы дифференциальных расходомеров, шкалы которых выражают непосредственно мгновенный расход потока и количество протекшей жидкости или пара.

Шкалы расходомеров градуируются для каждого измеряемого вещества и не могут быть универсальными, т. е. прибор, предна-

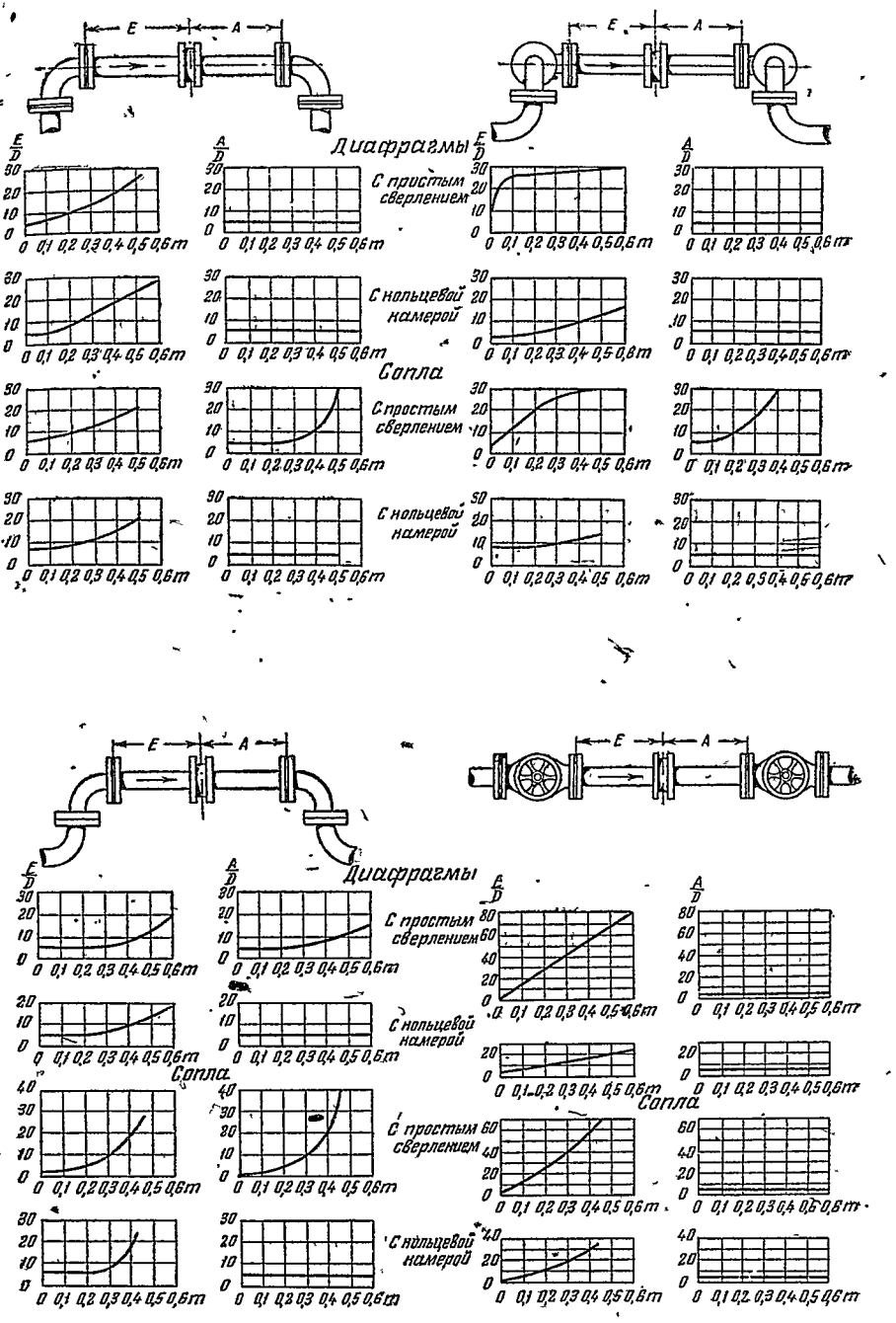


Рис. 106. Длины прямых участков трубопровода для установки дроссельных приборов.

значенный для измерения расхода пара, не может без переградуировки быть использованным для измерения расхода какого-либо газа и т. п.

Расходомеры для дроссельных приборов конструктивно разделяются на: поплавковые, колокольные и кольцевые весы. По работе приборов различают указывающие, регистрирующие и интегрирующие приборы. Наконец, различают приборы местного действия и приборы с телепередачей показаний.

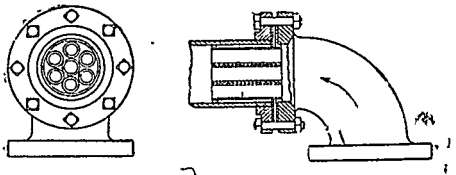


Рис. 107. Струевыпрямитель.

Присоединение дифференциального расходомера к дроссельному прибору производится трубками диаметром 6—8 *мм*, лучше всего медными. При измерении активных жидкостей или газов трубки должны быть изготовлены из материала, устойчивого к действию данной среды, или защищены от ее действия.

Принципиальная схема присоединения расходомера к дроссельному прибору изображена на рис. 108.

Трубки, соединяющие дроссельный прибор с дифференциальным расходомером, снабжены запорными вентилями *1* и *2* у дроссельного прибора, запорными вентилями *3* и *4* у расходомера и переходным вентилем *5*, соединяющим обе линии.

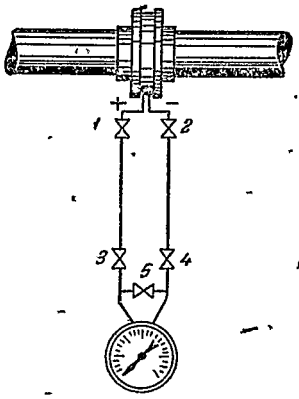


Рис. 108. Схема присоединения дифференциального манометра к дроссельному прибору:

1, 2, 3, 4, 5 — запорные вентили.

Такое устройство обеспечивает расходомер от односторонней нагрузки при включении, ведущей к поломке расходомера.

Ввод расходомера в работу производится следующим образом. Открывают переходной вентиль *5* при закрытых вентилях *1, 2, 3* и *4*. Затем открывают вентили *1* и *2*; далее медленно и одновременно открывают вентили *3* и *4* и после этого медленно закрывают вентиль *5*.

При выводе расходомера из работы манипуляции производятся в обратном порядке. Открытием вентиля *5* при закрытых остальных вентилях производится также поверка нулевой точки расходомера.

Обычно вентили *3, 4* и *5* объединяются в один блок и управляются одной рукояткой или выполняются в виде одного многоходового крана.

Частные виды монтажа, сохраняя приведенную принципиальную схему, зависят от рода измеряемой среды и взаимного расположения дроссельного прибора и расходомера.

На рис. 109 показан способ монтажа расходомера для жидкости при горизонтальном расположении трубопровода.

При расположении расходомера выше дросселя необходимо подводящие трубки располагать в виде буквы П. Горизонтальные ветви обеих линий должны обязательно лежать в одной плоскости, чтобы отрицательное давление, создаваемое столбами жидкости в вертикальных ветвях, было равно для обеих ветвей.

Измерение расхода пара вносит некоторое изменение в схему монтажа. Для обеспечения постоянства условий измерения, а также для защиты расходомера от действия высокой температуры пара соединительные трубки заполняются конденсатом. Для этого в схему соединительной линии включают так называемые уравнительные или конденсационные сосуды.

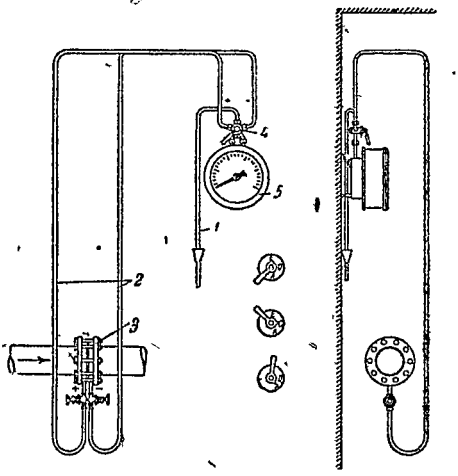


Рис. 109. Установка дроссельных расходомеров для измерения жидкости:

1 — линия продувки; *2* — соединительный трубопровод; *3* — дроссельный прибор; *4* — кран-манипулятор; *5* — расходомер.

Конденсационные сосуды располагаются на одной высоте и снабжены переливом, поддерживающим уровень конденсата в обоих сосудах в одной плоскости. Соотношение между величиной перепада давления и высотой ртутного столба диференциального манометра при условии, что уровень конденсата в обоих уравнительных сосудах лежит на одной высоте, как легко вывести из условий равновесия, выразится формулой:

$$p_1 - p_2 = \Delta p = h(\gamma_1 - \gamma_2), \qquad (105)$$

где p_1; p_2 и Δp — давления в *кг/м²*;
h — высота столба ртути в *мм*;
γ_1 — плотность ртути в *г/см³*;
γ_2 — плотность конденсата в *г/см³*.

На рис. 110 показано присоединение расходомера к дроссельному прибору при измерении расхода пара.

При измерении газовых потоков приходится различать два основных случая: измерение расхода неагрессивных газов и измерение расхода агрессивных газов.

Поскольку во многих случаях газы насыщены влагой или парами других жидкостей, способными конденсироваться в соединительных трубопроводах, приходится вводить в схему уловитель конденсата для избежания закупорки трубок или накапливания в них конденсата, давление которого может исказить результаты измерения. Конденсатоуловители, конечно, необходимо устанавливать лишь в случае расположения расходомера ниже дроссельного прибора. На рис. 111 показан монтаж с введением конденсатоуловителей, обозначенных на рисунке цифрой *6*.

При расположении расходомера выше дроссельного прибора надобность в конденсатоуловителе отпадает, так как конденсат по мере образования будет стекать по соединительным трубкам обратно в трубопровод.

В случае измерения агрессивных газов в схему приходится вводить защитные сосуды, заполненные маслом или другой нейтральной жидкостью. Схема монтажа в этом случае напоминает монтажную схему при измерении

пара с заменой конденсационных сосудов защитными. На рис. 112 показано устройство защитного сосуда и его соединение с диафрагмой на горизонтальном трубопроводе.

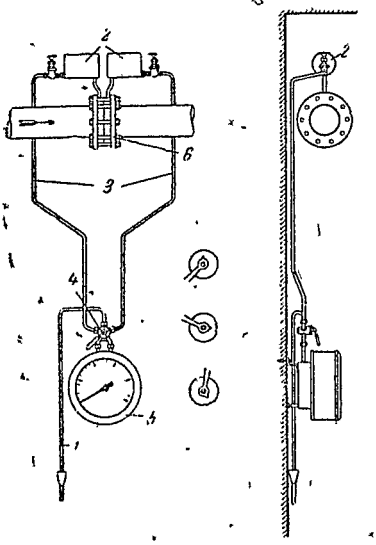


Рис. 110. Установка дроссельных расходомеров для измерения расхода пара:

1 — линия продувки; *2* — уравнительные сосуды; *3* — соединительный трубопровод; *4* — кран-манипулятор; *5* — расходомер; *6* — дроссельный прибор.

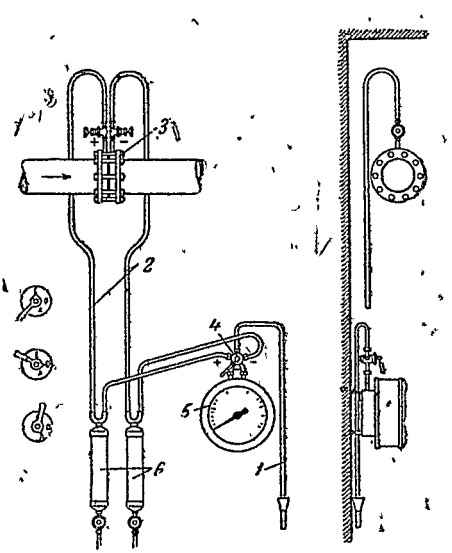


Рис. 111. Установка дроссельных расходомеров для измерения расхода газа:

1 — линия продувки; *2* — соединительный трубопровод; *3* — дроссельный прибор; *4* — кран-манипулятор; *5* — расходомер; *6* — сборники конденсата.

25. Поплавковые, колокольные и типа кольцевых весов расходомеры

Поплавковые расходомеры. Принципиальная схема поплавкового расходомера представлена на рис. 113. Расходомер состоит из двух сообщающихся сосудов *1* и *2*, заполненных до некоторой высоты ртутью. На поверхности ртути в сосуде *1* плавает поплавок *3*, несущий тягу *4*, шарнирно связанную с рычагом *5*, вращающимся вокруг оси *6*. Ось *6* проходит через сальник в стенке сосуда *2* и на выходящем конце ее насажен зубчатый сектор, сцепляющийся с шестеренкой, на оси которой укреплена указательная стрелка.

Передача движения поплавка стрелке прибора может быть осуществлена другими способами, исключающими наличие сальника, трение в котором неизбежно вносит некоторую погрешность в показания прибора.

Формула расхода $Q = k\sqrt{H}$ дает квадратичную зависимость между перепадом давления и величиной расхода. Поэтому без применения особых приспособлений шкалы дифференциальных рас-

ходомеров будут неравномерны, а это затрудняет отсчет и, еще больше, запись и последующее планиметрирование полученной диаграммы.

Поплавковые расходомеры пригодны для работы при высоких абсолютных давлениях до 150 и даже до 350 *кг/см²* для отдельных типов.

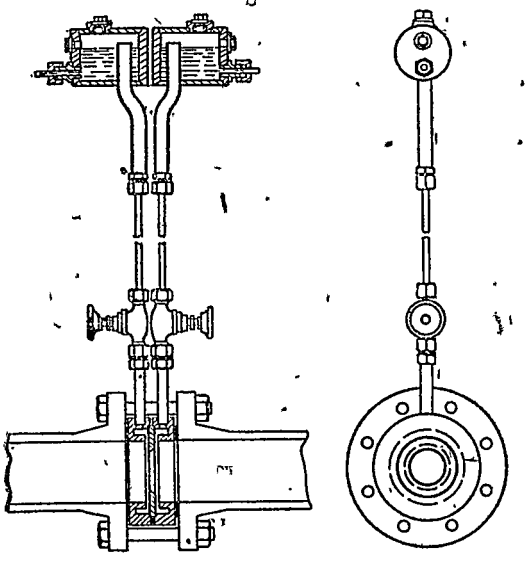


Рис. 112. Защитные сосуды.

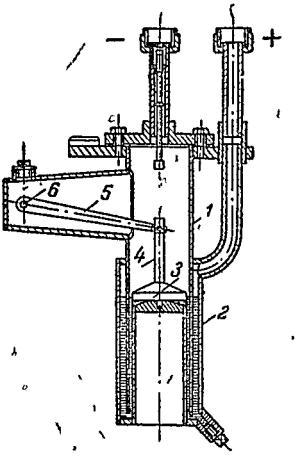


Рис. 113. Поплавковый расходомер:
1 и *2* — сообщающиеся сосуды; *3* — поплавок; *4* — тяга поплавка; *5* — рычаг; *6* — ось рычага.

Максимальные перепады давления, на которые строятся поплавковые расходомеры, колеблются от 40,64 до 1020 *мм* рт. ст. Гарантируемая точность ± (1,5—3%) от максимального значения шкалы. Расходомеры пригодны для измерения любых величин расходов в пределах указанных перепадов, так как абсолютная величина расхода определяется размерами дроссельного прибора. Однако колебания расхода не должны быть больше 5 : 1 или 6 : 1, так как при больших колебаниях точность измерения резко понижается.

Поплавковые расходомеры могут выполняться указывающими, регистрирующими, местного действия и с электрическими передатчиками. На один электропередатчик может быть включено два вторичных прибора.

Поплавковый расходомер завода «Тизприбор» (рис. 114) состоит из широкого сосуда *1* с поплавком, соединяемого с пространством перед диафрагмой (плюсовой сосуд), и узкого сосуда *2*, присоединяемого к области меньшего давления (минусовый сосуд); сосуды соединены между собой трубкой *3*.

Ход поплавка через рычаг *4* передается оси *5*, проходящей через уплотнительную муфту сальникового типа. На втором сво-

бодном конце оси закреплен рычаг, приводящий во вращение ось стрелки прибора. Заливка ртути производится через отверстие в крышке плюсового сосуда, закрываемое винтом *6*. На нижней ветви соединительной трубки помещен кран *7* для спуска ртути из прибора. Для предупреждения выброса ртути при резком толчке давления поплавок на нижней поверхности несет дисковый клапан, садящийся при крайнем нижнем положении поплавка на седло, выточенное в дне плюсового сосуда, и таким образом отключающий колена прибора друг от друга.

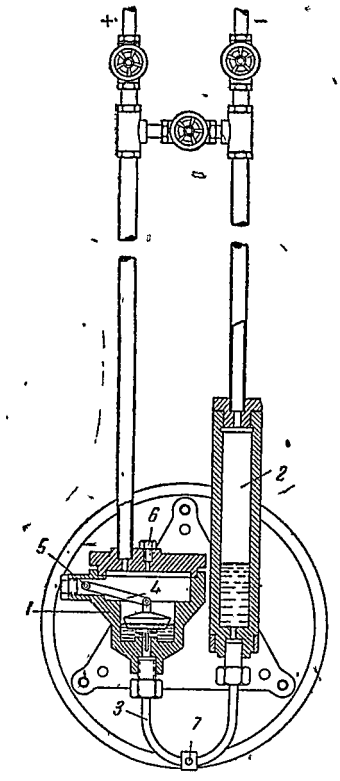


Рис. 114. Поплавковый расходомер завода «Тизприбор»:

1 — плюсовый сосуд с поплавком; *2* — минусовый сосуд; *3* — соединительная трубка; *4* — рычаг; *5* — ось рычага; *6* — винтовая пробка; *7* — кран для спуска ртути.

Прибор рассчитан на абсолютное давление 150 *кг/см*². Минусовые сосуды сменные различного диаметра и высоты дают возможность получать перепады разной величины, в пределах от 40 до 1020 *мм* рт. ст.

Ход поплавка для всех величин перепадов 30,5 *мм*. Допускаемая погрешность ± 1,5% от максимального значения шкалы.

Шкала прибора неравномерна вследствие отсутствия каких-либо устройств для перевода квадратичной зависимости в линейную; это является недостатком конструкции прибора. Простота устройства прибора делает его надежным в работе и нетребовательным к уходу.

Прибор изготовляется указывающим, регистрирующим, регистрирующим с интегратором, указывающим с интегратором, регистрирующим с параллельной регистрацией давления, а также в виде прибора с телепередатчиком типа индукционного мостика. Вторичные приборы к расходомеру с индукционным передатчиком выпускаются в следующих модификациях: 1) указывающий контактный, 2) регистрирующий контактный, 3) регистрирующий с записью температуры (две кривых), 4) регистрирующий с записью давления (две кривых), 5) регистрирующий с записью давления и температуры (три кривых), 6) регистрирующий с записью двух давлений (три кривых), 7) регистрирующий с записью двух температур (три кривых), 8) регистрирующий с интегратором и записью температуры (две кривых и счетчик) и 9) регистрирующий с интегратором и записью давления (две кривых и счетчик).

Все расходомеры завода «Тизприбор» и все вторичные приборы имеют круглую циферблатную шкалу и дисковую диаграмму, что является серьезным их недостатком.

Интегратор приборов завода «Тизприбор» имеет следующее устройство (рис. 115). На оси поплавка *1* дифференциального манометра закреплено лекало *2*, угол поворота ко-

торого пропорционален ходу поплавка. Моторчик Уоррена приводит во вращение ось *4*, на которой насажены профилированный фрикционный диск *5* и кулак *6*. Диск *5* снабжен кривошипом *7*, соединенным шатуном *8* с коленчатым рычагом *9*, вращающимся на оси *10*. Рычаг *9* шарниром *11* связан с рычагом *12*, имеющим ось вращения *13*, закрепленную в кронштейне *14* падающей рамки *15*. На оси *13* вращается также рычаг *16*. Рычаги *12* и *16* при подъеме рамки *15* могут соединяться друг с другом путем сце-

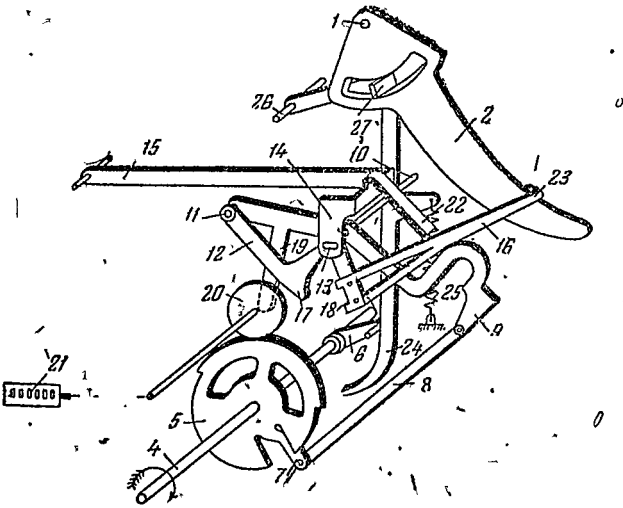


Рис. 115. Интегратор завода «Тизприбор»:

1 — ось поплавка расходомера; *2* — лекало; *4* — ось фрикционного диска; *5* — фрикционный интегрирующий диск; *6* — кулак тормоза; *7* — кривошип; *8* — шатун; *9* — коленчатый рычаг; *10* — ось коленчатого рычага; *11* — шарнир; *12* — рычаг; *13* — ось рычага *12*; *14* — кронштейн падающей рамки; *15* — падающая рамка; *16* — рычаг; *17* — замыкающие выступы; *18* — замыкающая впадина; *19* — отросток рамки; *20* — фрикционный ролик; *21* — счетчик; *22* — отросток рамки; *23* — крючок рычага *16*; *24* — рычаг тормоза; *25* — пружина тормоза; *26* — ось тормоза; *27* — палец тормоза.

пления выступа *17* на рычаге *12* с впадиной *18* на рычаге *16*. Падающая рамка *15* несет на вертикальном отростке *19* фрикционный ролик *20*, ось которого кинематически связана со счетчиком *21*.

Работа интегратора протекает следующим образом. При вращении оси *4* шатун *8* поворачивает рычаг *9* вокруг оси *10*. Левый конец рычага *9* опускает сперва рычаг *12*, вращая его вокруг оси *13*. При дальнейшем повороте рычага *9* он встречает отросток *22* падающей рамки *15* и начинает поднимать ее. Рычаг *16*, увлекаемый точкой опоры *13* в кронштейне рамки, начинает по-

ворачиваться, приближаясь к рычагу *12*, и входит с ним в зацепление, после чего вся система продолжает движение вверх, как одно целое. После перехода шатуна *8* через верхнюю мертвую точку система падающей рамки начнет опускаться, следуя за нисходящим движением рычага *9* до тех пор, пока крючок *23* рычага *16* не встретится с поверхностью лекала *2*. Давление лекала на крючок рычага *16* выведет его из зацепления с рычагом *12*, и падающая рамка получит возможность двигаться вниз независимо от движения рычага *9*.

При падении рамки *15* ролик *20* придет в соприкосновение с выступающей частью обода фрикционного диска *5* и начнет вращаться, передавая вращение счетчику *21*. Число оборотов ролика будет зависеть от длины пути, который он совершит по выступу обода фрикционного диска, а длина пути в свою очередь будет зависеть от момента встречи рычага *16* с лекалом *2*, момент же этот определяется положением лекала или, что то же, положением поплавка диференциального манометра. Профиль лекала подобран так, что число оборотов ролика *20* соответствует расходу в данный момент. Чтобы давление рычага *16* на лекало не передавалось поплавку диференциального манометра, введено тормозное приспособление, работающее от кулака *6*. В тот момент, когда рычаг *16* приближается к лекалу, кулак *6* освобождает рычаг *24*, который под действием пружины *25*, поворачиваясь вокруг оси *26*, прижимается пальцем *27* к поверхности прорези лекала, фиксируя его положение.

Кинематическая связь оси ролика *20* со счетчиком устроена таким образом, что разгружает ролик от работы вращения счетного механизма, давая возможность ролику вращаться без проскальзывания по фрикционному диску.

Несмотря на сложность механизм интегратора очень точен и надежен в работе.

Расходомер ВТИ с телепередачей (рис. 116) состоит из: распределительной головки, диференциального манометра, трансформаторного передатчика, указывающего и суммирующего прибора.

Распределительная головка снабжена кранами, позволяющими одним движением рукоятки получать одно из трех положений: а) «включено», б) «выключено» и в) «продувка линий». В положении «выключено» плюсовой и минусовый сосуд соединены между собой и прибор должен стать на нуль. Для высоких давлений (до 130 *кг/см*^{2}) краны распределительной головки заменяются игольчатыми вентилями.

Распределительная головка соединена с сосудами диференциального манометра тонкими стальными трубками *а*. Плюсовой сосуд *ж* в верхней части заканчивается трубой из немагнитной стали *г*, входящей в воздушный промежуток трансформатора. Внутри трубы *г* движется плунжер из мягкого железа, соединенный штоком с карболитовым поплавком *е*, плавающим на поверхности ртути, залитой в сосуд *ж*. Сосуд *ж* цилиндрической формы с небольшим коническим уширением в верхней части для повышения точности измерений при малых расходах.

Минусовый сосуд *и*, сделан из цельнотянутой стальной трубы диаметром 31/41 *мм*.

Трансформаторный передатчик имеет три стержня, расположенные в одной плоскости. На верхнем стержне намотана первичная обмотка для включения в сеть переменного тока 110 или 220 *в*. Два нижних стержня с воздушным промежутком снабжены каждый двумя вторичными обмотками: об-

моткой с малым числом витков из толстой проволоки для присоединения к последовательной обмотке счетчика и обмоткой с большим числом витков для

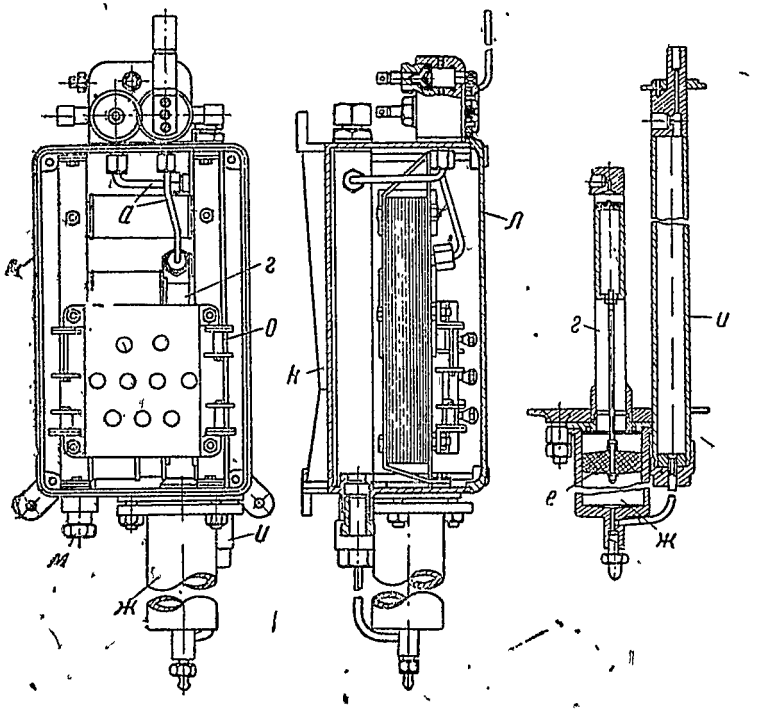


Рис. 116. Расходомер ВТИ с телепередачей:

а — трубки для подвода давления; *г* — трубка из диамагнитного металла; *е* — карболитовый поплавок; *ж* — плюсовый сосуд; *и* — минусовый сосуд; *к* — кожух прибора; *л* — дверка кожуха; *м* — штуцер для выхода проводов; *о* — трансформаторный телепередатчик.

присоединения указывающих приборов; схема соединений показана на рис. 117.

В качестве суммирующего прибора применен обычный однофазный счетчик со следующими изменениями: счетчик перемотан на меньшую силу тока, постоянный тормозной магнит заменен электромагнитом, питаемым от вторичной обмотки передатчика, и, для тонкой регулировки, добавлена небольшая железная масса, создающая дополнительный отрицательный вращающий момент диска счетчика. Эти изменения уменьшают влияние колебаний напряжения сети и осуществляют извлечение квадратного корня. В самом деле, момент, создаваемый рабочими обмотками счетчика, равен

$$M_1 = A_{\text{пар}} \Phi_{\text{посл}}, \qquad (106)$$

так как $A_{\text{пар}}$ постоянен (катушка напряжения присоединена к сети), то это уравнение можно написать так:

$$M_1 = A_1 \Phi_{\text{посл}}. \qquad (107)$$

Тормозящий момент равен:

$$M_2 = B\Phi^2_{\text{тр}}. \qquad (108)$$

В каждый данный момент

$$M_1 = M_2$$

или

$$A_1 \Phi_{посл} = B\Phi^2_{тр}, \qquad (109)$$

где $\Phi_{посл}$ — магнитный поток последовательной обмотки;
$\Phi_{тр}$ — магнитный поток тормозного электромагнита.

Указывающий прибор типа логометра Гейгера для переменного тока. Толстая обмотка среднего стержня замкнута на сопротивления R_2+R_3 для обеспечения в рабочем состоянии правильного распределения магнитного потока между крайними и средним сердечниками и для создания обратной э. д. с., компенсирующей э. д. с. рассеяния в толстой обмотке нижнего стержня при нулевом положении прибора.

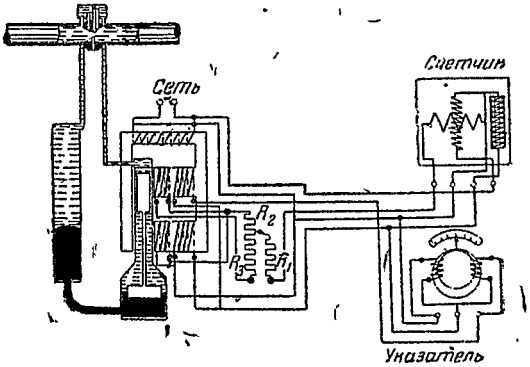


Рис. 117. Электрическая схема расходомера ВТИ.

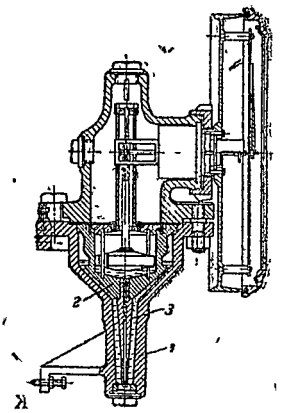


Рис. 118. Поплавковый расходомер Сименса:
1 и *2* — сообщающиеся сосуды; *3* — параболическая вставка.

Последовательная обмотка счетчика присоединена через сопротивления R_2 и R_1 к толстой обмотке крайнего стержня, параллельная — непосредственно в сеть. Электромагнитный тормоз присоединен к тонкой обмотке крайнего стержня. При нормальной нагрузке расходомера в пределах 30—100% максимального расхода погрешность прибора при принятой схеме не превышает $\pm$ 3% для высокого и $\pm$ 2,5% для среднего давления.

Колебания напряжения сети на $\pm$ 10% вызывают погрешность суммирующего прибора при малых расходах от —2 до +3%, при больших расходах от —0,2 до +0,4%.

Погрешность указывающего прибора не превосходит $\pm$ 0,8% на крайних делениях шкалы.

Расходомер Сименса. Конструкция поплавкового расходомера Сименса устраняет два наиболее серьезных недостатка обычных поплавковых расходомеров: неравномерность делений шкалы и вредные сопротивления сальника оси поплавка.

Расходомер (рис. 118) состоит из двух сообщающихся сосудов *1* и *2*, расположенных один внутри другого. Наружному (плюсовому) сосуду придана своеобразная коническая форма, усиленная параболической вставкой *3*, прикрепленной к дну минусового сосуда. По оси этой вставки проходит канал, соединяющий оба сосуда. Эта форма плюсового сосуда обеспечивает извлечение квадратного корня, т. е. понижению уровня ртути в плюсовом сосуде на 1, 4, 9, 16, 25 и т. д. единиц соответствует повышение уровня в минусовом сосуде на 1, 2, 3, 4, 5 и т. д. единиц. Иначе говоря, перемещение поплавка будет пропорционально изменению расхода. Вследствие этого шкала прибора

получается равномерной, а диаграммы легко планиметрируемыми. Устранение сальника с неизбежным вредным трением в нем, осуществлено в этом расходомере применением магнитной муфты (рис. 119).

Шестерня *1* муфты, сцепленная с зубчатой рейкой поплавка, находится в герметически закрытой камере прибора (в минусовой полости). На конце оси *2* шестерни насажен сильный подковообразный магнит *3*. Нейзильберовая или бронзовая коробка *4* наглухо отделяет минусовую камеру прибора от внешнего пространства. Внутри коробки *4* помещен якорь *5* из мягкого железа, несущий на своей оси *6* шестеренку *7*, сцепляющуюся с шестерней оси стрелки прибора. Связь между осями *2* и *6* осуществляется силовыми магнитными линиями, проходящими от полюсов магнита *3* к якорю *5* через диамагнитную перегородку.

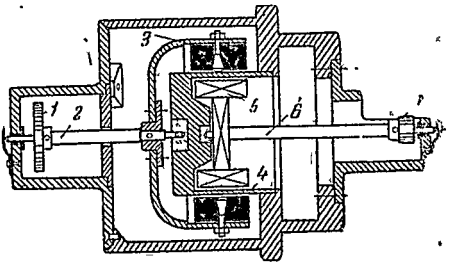


Рис. 119. Магнитная муфта:
1 — шестерня; *2* — ось шестерни; *3* — подковообразный магнит; *4* — диамагнитная коробка; *5* — якорь; *6* — ось якоря; *7* — шестеренка передачи на стрелку.

Колокольные расходомеры. Регистрирующий колокольный расходомер Ленэнерго (рис. 120) состоит из прямоугольного железного кожуха *1*, внутри которого помещен чугунный корпус *2* расходомера, герметически закрытый крышкой *3*. В дно корпуса ввинчен стальной стакан *4*, наполненный ртутью. В стакан вварена трубка *5*, подводящая плюсовое давление из трубы *6* под колокол *7*, плавающий в ртути. Верхняя полость колокола над ртутью, а также все внутреннее пространство корпуса, включая соединительные трубки, заполнены водой. Внутреннее пространство корпуса *2* соединено трубкой *8* с минусовым давлением.

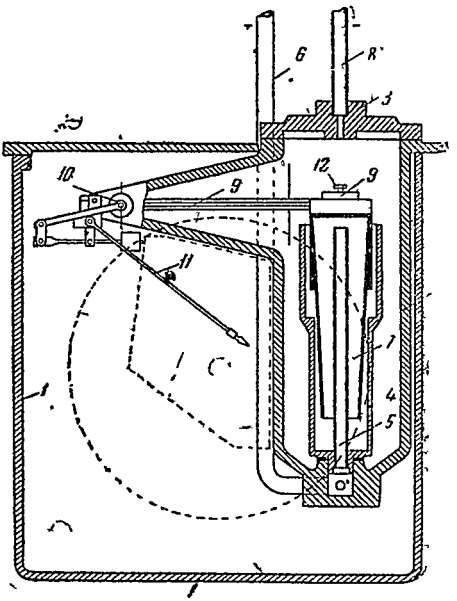


Рис. 120. Колокольный расходомер Ленэнерго:
1 — кожух прибора; *2* — корпус расходомера; *3* — крышка; *4* — стакан с ртутью; *5* — труба плюсового давления; *6* — подводящая труба; *7* — колокол; *8* — минусовая труба; *9* — вилка подвеса колокола; *10* — ось подвеса; *11* — регистрирующее перо; *12* — воздушная пробка.

Под действием перепада давления колокол всплывает выше или ниже. Перепад давления уравновешивается увеличением веса колокола при всплывании. Стенки колокола утолщаются книзу, так как внутренняя поверхность его расточена по параболе; вследствие этого, а также уменьшения подъемной силы из-за уменьшения книзу внутренне-

го сечения высота подъема колокола пропорциональна корню квадратному из перепада давления, т. е. пропорциональна расходу. Подъем колокола вилкой *9*, на которой он подвешен, через ось *10* передается рычажному механизму, перемещающему перо *11* по дисковой диаграмме.

Прибор пригоден для давления до 30 *кг/см*^{2}. Максимальный перепад, измеряемый прибором, 1346 *мм* вод. ст. Гарантируемая точность $\pm$ 3% от максимального показания.

При пуске колокольных приборов следует обращать внимание на полное удаление воздуха из-под колокола, для чего служит воздушная пробка *12*.

Недостатком прибора следует признать наличие сальника, вводящего неучитываемую величину погрешности вследствие трения, и малые размеры и недостаточную четкость шкалы.

Колокольный расходомер для малых перепадов. Для измерения малых перепадов ртутные расходомеры не пригодны из-за малой чувствительности. Колокольный расходомер типа Броуна, изображенный схематически на рис. 121, состоит из железного цилиндрического резервуара *1*, герметически закрытого крышкой *2*. Внутри резервуара помещен колокол *3* большого диаметра, плавающий в масле, наполняющем резервуар. Под колоколом помещен концентрично стальной стакан *4*, наполненный ртутью, в которую погружен поплавок *5*, жестко скрепленный с колоколом. Увеличение веса поплавка при подъеме колокола за счет частичного выхода его из ртути уравновешивает перепад давлений. Внутренняя полость резервуара соединяется с минусовым давлением трубой *6*; а пространство под колоколом с плюсовым давлением трубой *7*. Расходомер снабжен телепередатчиком типа индукционного мостика. Прибор выгодно отличается отсутствием сальников и вредных сопротивлений и возможностью соответствующей формой поплавка получить простую линейную зависимость между ходом колокола и величиной расхода.

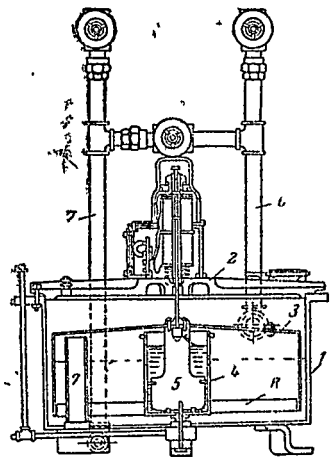


Рис. 121. Колокольный расходомер для малых перепадов давления:

1 — цилиндрический резервуар; *2* — крышка; *3* — колокол; *4* — стакан с ртутью; *5* — поплавок; *6* — труба минусового давления; *7* — труба плюсового давления.

Расходомеры этого типа строятся на перепады 5—400 *мм* вод. ст., обладают высокой чувствительностью и погрешностью порядка от $\pm$ 1,5 до $\pm$ 2% максимального значения шкалы.

Кольцевые весы. Расходомеры типа кольцевых весов пользуются широким распространением для малых и умеренных перепадов давления (от 25 *мм* вод. ст. до 200 *мм* рт. ст.). Достоинствами кольцевых весов является простота устройства для извлечения квадратного корня, возможность регистрации, суммирования и передачи показаний на расстояние; легкость перехода от одного предела измерения к другому сменой предельных грузов, равномерность и прямолинейность шкал и диаграмм. К недостаткам приборов можно отнести: чувствительность к качеству

сборки и монтажа; наличие спиральных пружинящих труб, подводящих давление, которые при недостаточной эластичности могут вносить погрешность в измерение; медленная посадка на нуль.

Теория равновесия кольцевых весов была изложена в гл. II (стр. 26) и возвращаться к ней нет необходимости.

Приспособления для извлечения квадратного корня из перепада давлений у кольцевых весов можно разделить на три конструктивных типа: 1) параболическое лекало в плоскости кольца, 2) параболическое лекало на боковой поверхности кольца и 3) подвеска уравновешивающего груза, изменяющая его момент.

Первый тип квадратичного устройства существует в нескольких конструктивных вариантах. В одних лекало жестко скреплено со стрелкой прибора и ведется пальцем, укрепленным на кольце (рис. 122). В других лекало связано с кольцом и по нему катится палец рычага, соединенного со стрелкой (рис. 123).

Схема прибора с лекалом, лежащим на боковой поверхности кольца, изображена на рис. 124.

Система с изменяющимся моментом уравновешивающего груза (рис. 124) позволяет получить шкалу с большим углом охвата и равномерными делениями.

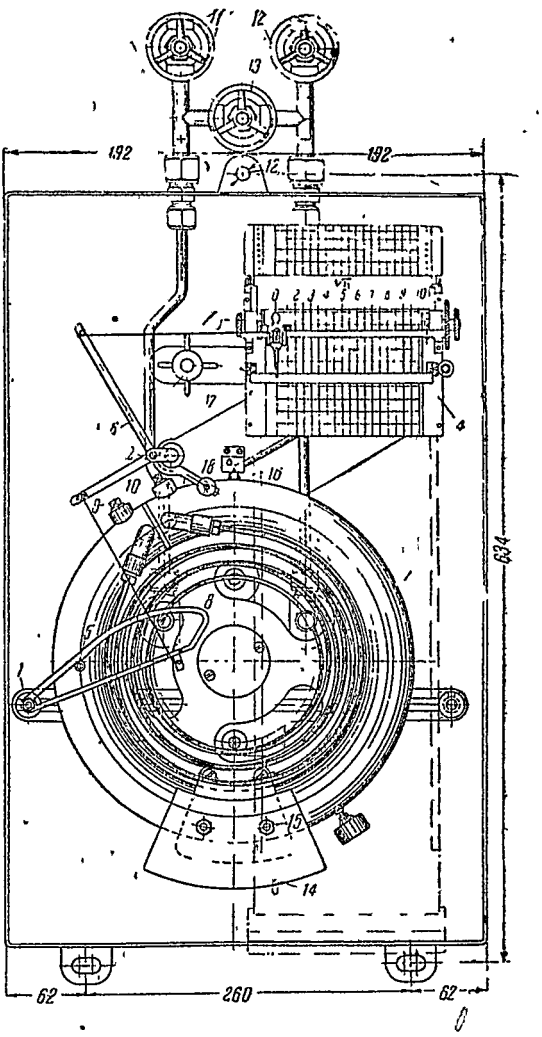


Рис. 122. Расходомер типа кольцевых весов с передачей лекалом, связанным со стрелкой:

1 — квадратичное лекало; *2* — ось коленчатого рычага; *3* — указательная стрелка с пером; *4* — диаграммная лента; *5* — палец кольца весов, поворачивающий лекало; *6* — колейчатый рычаг; *7* — кольцо весов; *8* — спиральные трубки, подводящие давление; *9—10* — пробки; *11*, *12*, *13* — вентили; *14* — уравновешивающий груз; *15* — болты для крепления груза; *16* — указатель нулевого положения; *18* — шкала нулевого положения.

Кольцевые весы для рабочего давления до 32 *кг/см*² и перепадов от 36—200 *мм* изготовляются из цельнотянутой стальной трубы диаметром 35—60 *мм* и заполняются ртутью (рис. 122). Подвод давления осуществляется тонкими спиральными металлическими трубками (рис. 122, *б*), витки которых навиты в противоположных направлениях. При повороте кольца в спиралях возникают усилия, действующие в разные стороны и взаимно уравновешивающиеся.

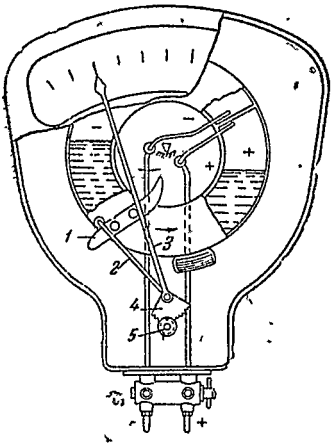


Рис. 123. Кольцевые весы с лекалом в плоскости кольца:

1 — лекало; *2* — рычаг; *3* — стрелка; *4* — зубчатый сектор; *5* — шестерня с пружиной.

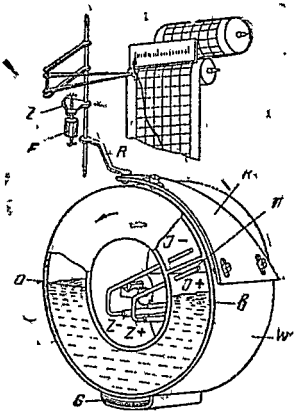


Рис. 124. Кольцевые весы с лекалом на боковой поверхности кольца:

W — кольцо весов; *T* — полость кольца; *K* — лекало; *G* — уравновешивающий груз; *R* — поводок оси стрелки; *Z* — зубчатый сектор; *F* — реостат омического передатчика.

Кольцевые весы для рабочего давления до 0,5 *кг/см*² и перепадов 25—144 *мм* вод. ст. изготовляются из листов меди, латуни или никеля в виде кольца прямоугольного сечения 50 × 100 или 60 × 120 *мм* (рис. 123 и 124) и заполняются водой с добавкой 1% формалина для предохранения ее от порчи. В случае работы расходомера при температурах ниже 0° вместо воды применяют жидкости, близкие по плотности к воде и незамерзающие при данных температурах. Для температур, близких к 0°, можно пользоваться смесью 3% спирта, 7% глицерина и 90% дистиллированной воды (в объемных %). Эта смесь замерзает при —6°.

Дистанционные передатчики кольцевых весов. Передача показаний на расстояние в кольцевых весах осуществляется омическими передатчиками и передатчиками типа Гейгера, описанными в гл. II (стр. 46), также электродинамическим передатчиком переменного тока, состоящим

(рис. 126) из передатчика и вторичного прибора одинакового устройства.

Каждый прибор состоит из железного ярма *1*, несущего обмотку *2*, питаемую от сети переменного тока 110 или 220 *в*. В цилиндрической выточке ярма вокруг железного сердечника *3* вращается рамка *4*, подобная рамке гальванометра Депре д'Арсонваля. Обе рамки передатчика и вторичного прибора соединены проводами навстречу друг другу. Ось рамки передатчика

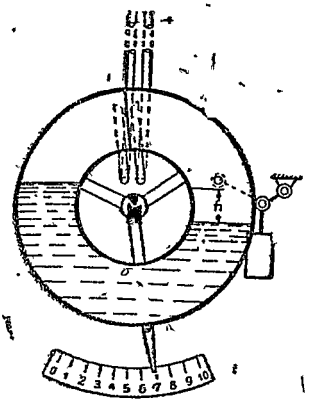


Рис 125. Кольцевые весы с изменяющимся моментом уравновешивающего груза.

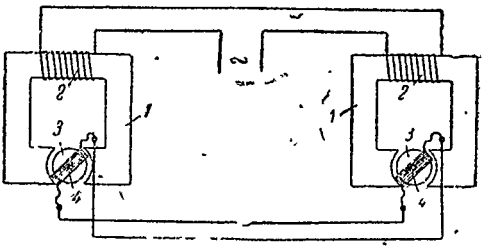


Рис. 126. Электродинамический передатчик кольцевых весов:

1 — железное ярмо; *2* — возбуждающая обмотка; *3* — сердечник; *4* — рамка.

связана с осью указывающей стрелки кольцевых весов, повторяя ее движения. Ось рамки вторичного прибора несет указательную стрелку, движущуюся по шкале.

Действие системы основано на равенстве э. д. с., индуктируемых в обеих рамках при одинаковых положениях их относительно магнитопроводов. При этом в соединительных проводах ток отсутствует, так как э. д. с. обеих рамок направлены друг против друга. Изменение положения одной из рамок нарушает равновесие э. д. с., и в соединительных проводах возникает ток, действие которого вызывает поворот второй рамки до положения, тождественного с положением первой. Таким образом рамка вторичного прибора точно воспроизводит перемещения рамки передатчика.

Погрешность приборов типа кольцевых весов не превосходит $\pm 1{,}5$ от максимального значения шкалы. Допустимые пределы колебаний расхода, в которых сохраняется указанная точность, от 1 : 5 до 1 : 7. Начальная часть шкалы в пределах 10—20% является нерабочей, так как точность ее очень низка.

Вторичные приборы с электропередачей имеют несколько большую погрешность за счет ошибок передаточной системы, доходящую до $\pm$ 2,5 от максимального значения шкалы.

Кольцевые весы изготовляются многими заводами; лучшие приборы завода «Тизприбор» и КИП Главкокса.

Кольцевые весы помимо тщательности изготовления и балансировки требуют весьма точной установки по уровню и отвесу и

обеспечения неподвижности и постоянства установки. Самые незначительные отклонения от строго вертикального положения сильно отражаются на работе прибора. Хорошо изготовленные и точно установленные приборы весьма надежно работают в течение ряда лет.

26. Расходомеры постоянного перепада давления

Из формулы расхода:

$$Q = Kf\sqrt{\Delta p}, \qquad (110)$$

вытекает, что переменной величиной в правой части равенства может быть не только Δp, но и f и даже оба эти множителя одновременно. В предыдущих параграфах были рассмотрены расходомеры с постоянным сечением $f = \text{const}$, но с переменным перепадом давления $\Delta p = var$.

Из этой же формулы видно, что изменение величины сечения в некотором отношении выгоднее изменения перепада, так как изменение расхода находится в простой линейной зависимости от изменения площади сечения, а следовательно, приборы, построенные по принципу изменения сечения, не будут нуждаться в приспособлениях для извлечения квадратного корня и будут иметь равномерную шкалу[1].

Приборы с постоянным Δp и переменным сечением сконструированы и используются в измерительной технике. В основном эти приборы состоят из поршня или поплавка, движущегося в корпусе той или иной формы и открывающего при движении на большую или меньшую величину выходное отверстие. Подъем поршня или поплавка, линейно связанный с приращением площади отверстия, тем или иным способом отмечается, выражаясь непосредственно в величине расхода.

Силой, поднимающей поршень или поплавок, является разность давлений по обеим сторонам поршня, а уравновешивающей силой — вес поплавка. Так как вес поплавка и соединенных с ним деталей постоянен, то и перепад давлений должен оставаться постоянным.

Приборы этого типа можно разделить конструктивно на три группы: 1) приборы с прямоугольным проходом, 2) приборы с кольцевым проходом и 3) приборы с свободным поплавком (ротаметры).

Расходомер постоянного перепада завода «Тизприбор». Расходомер постоянного перепада состоит из первичного прибора (датчика) и одного или нескольких вторичных приборов. Первичный прибор слепой, т. е. не имеет указателя и шкалы и снабжен электропередатчиком типа индукционного моста.

---

[1] Это не вполне точно, так как коэфициент K в формуле содержит в скрытой форме площадь сечения под знаком радикала. Кроме того, динамическое действие струи, усиливающееся с увеличением расхода, уменьшает Δp при высоких значениях расхода. Однако оба эти фактора сказываются на действии подобных приборов очень слабо и практически этой неточностью пренебрегают.

Датчик (рис. 127) представляет собой чугунный корпус *1*, включаемый в трубопровод. Корпус закрывается нижней, глухой крышкой *2* и верхней крышкой *3*, несущей на себе электропередатчик *4*. Внутрь корпуса вставлена втулка *5* с двумя отверстиями *6* и *7*. Отверстие *6* совпадает по форме, величине и положению с отверстием входного канала корпуса прибора; отверстие *7* прямоугольного сечения расположено против выходного канала корпуса. Внутри втулки *5* движется пришлифованный поршень *8*. В крайнем нижнем положении поршень опирается на цилиндрический выступ *9* нижней крышки, полностью закрывая отверстие *7*. С поршнем соединен шток *10*, проходящий в осевом канале верхней крышки прибора.

К верхней крышке присоединен фланец *11*, в котором герметически закреплена труба *12* из немагнитного металла, закрытая сверху винтовой пробкой *13*. Внутри трубы движется сердечник *14* из мягкого железа, соединенный хвостовиком *15* со штоком поршня. Трубу *12* окружают катушки электропередатчика.

Горловина *16* верхней крышки снабжена ребрами для охлаждения, защищающими электропередатчик от перегрева при измерении расхода среды с повышенной температурой. При измерении расхода очень вязкой жидкости эта горловина может быть снабжена паровой рубашкой для подогрева и устранения торможения штока.

Вся движущаяся система расходомера находится в герметически закрытом пространстве, чем устраняется надобность в сальниках или других уплотняющих устройствах, создающих торможение.

Расходомер легко перестраивается на разные пределы измерений изменением веса поршня путем надевания на шток поршня добавочных грузов *17* и изменением сечения выходного отверстия втулки *5*, ее заменой, для чего к прибору прикладываются сменные втулки.

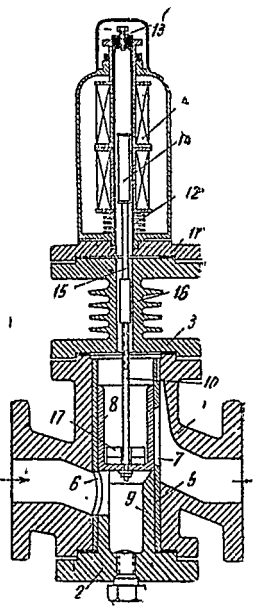


Рис 127. Расходомер постоянного перепада завода «Тизприбор»:

1 — корпус расходомера; *2* и *3* — крышки корпуса; *4* — электропередатчик; *5* — втулка; *6* и *7* — отверстия втулки; *8* — поршень; *9* — опорный выступ; *10* — шток поршня; *11* — фланец; *12* — труба сердечника; *13* — пробка; *14* — сердечник; *15* — хвостовик сердечника; *16* — горловина крышки; *17* — добавочные грузы.

При неизменной втулке добавкой грузов пределы измерения можно изменять на $\pm$ 20%.

Обоими способами, т. е. заменой втулки и изменением веса поршня, пределы измерений прибора при неизменных габаритах составляют 200—8150 *л/час*. Максимальный ход поршня и перемещения сердечника индукционного передатчика 30,5 *мм*.

Прибор отличается:

постоянством и небольшой величиной перепада давления (максимальный перепад 728 *мм* вод. ст., минимальный 225 *мм* вод. ст. в зависимости от веса поршня);

отсутствием сальников и уплотнений;

отсутствием жидкого заполнения;

небольшими габаритами (H=600 *мм*; L=264 *мм*), облегчающими установку его непосредственно на трубопроводе;

возможностью подогрева или охлаждения части, соприкасающейся с электропередатчиком;

возможностью установки на малых трубопроводах и измерения малых расходов (до 3,5 *л/мин*);

возможностью измерить расход вязких жидкостей и

возможностью изготовления деталей из коррозиоустойчивых материалов.

При установке расходомера необходимо выдержать длину прямолинейных участков трубопровода диаметром 2″ не менее 500 *мм* до расходомера и 400 *мм* после расходомера. Желательна установка фильтра перед расходомером для защиты втулки и поршня от повреждения взвешенными частицами. Деления шкалы при прямоугольном отверстии равномерны. Изменением формы отверстия можно при желании увеличить деления в начале или в конце шкалы, получив повышенную точность измерения малых или больших расходов.

Расходомер предназначен для измерения расхода жидкостей и газов.

Расходомер с кольцевым проходом. Расходомер (рис. 128) состоит из чугунного корпуса *1*, в который вставлена бронзовая насадка *5*, внутренняя поверхность которой отшлифована по параболоиду. В насадке помещен дисковый поршень *6*, связанный штоком *4* внизу с поршнем *3* катаракта, а вверху шарнирно с рычагом *9*. При протекании жидкости, газа или пара через прибор поршень *6* поднимается в насадке, открывая кольцевое сечение для прохода потока, пропорциональное количеству проходящей жидкости или газа. При этом рычаг *9*, поворачивая ось *10*, проходящую через сальник в корпус измерителя, передвигает указательную стрелку по шкале, градуированной в единицах расхода.

Прибор строится для трубопроводов 25—150 *мм* диаметром для расходов жидкостей 4—130 *м³/час* или насыщенного пара в зависимости от давления от 150 до 13 000 *кг/час*. Перепад давления в приборе составляет 400—1000 *мм* вод. ст.

При установке прибора должен быть выдержан прямолинейный участок трубопровода перед и за расходомером длиною не менее 10 диаметров трубопровода.

Приборы выполняются указывающими, регистрирующими, а также с передачей показаний на расстояние.

Аналогичный прибор системы инж. Попова изготовляется заводом ЛМЗ им. Сталина для диаметров трубопроводов 50, 80, 100 и 150 *мм*.

Ротаметры. Особую группу приборов постоянного перепада представляют так называемые ротаметры, отличительной чертой которых является свободно вращающийся поплавок.

Ротаметр, схема которого изображена на рис. 129, состоит из вертикальной стеклянной слабо конической трубки *1*, закрепленной в двух металлических головках *2* и *3*, снабженных фланцами

для включения в трубопровод. Головки стянуты между собой несколькими тягами *4*, образующими вместе с поперечинами *5* защитную решетку вокруг трубки *1*. Внутри трубки *1* свободно по-

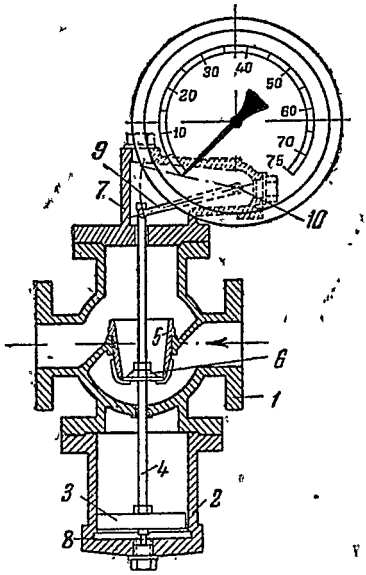


Рис 128. Расходомер с кольцевым проходом:

1 — корпус прибора; *2* — цилиндр катаракта; *3* — поршень катаракта; *4* — шток поршня; *5* — параболическая насадка; *6* — дисковый поршень; *7* — головка прибора; *8* — упор поршня; *9* — рычаг поршня; *10* — ось рычага.

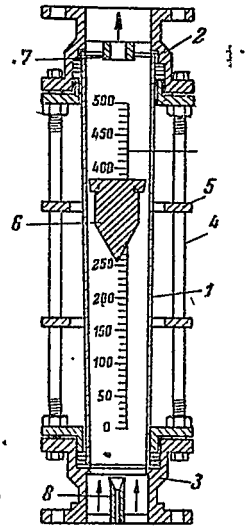


Рис. 129. Ротаметр:

1—стеклянная коническая трубка; *2* и *3* — металлические головки; *4* — тяги; *5* — поперечины; *6* — поплавок; *7* и *8* — упоры; *9*—шкала.

мещен поплавок *6*, имеющий форму волчка. Верхняя часть поплавка большего диаметра образует узкий кольцевой выступ, в котором прорезано несколько глубоких канавок под углом к образующей цилиндра. В верхней и нижней головке имеются упоры *7* и *8*, не позволяющие поплавку выйти за пределы стеклянной трубы прибора. Проходящий через прибор поток жидкости или газа увлекает поплавок вверх до тех пор, пока расширяющаяся кольцевая щель между телом поплавка и стенками трубки не создаст величину перепада давления по обе стороны поплавка, уравновешивающего вес поплавка. Шкала прибора *9* вытравлена на самой стеклянной трубке, и отсчет ведется по верхней горизонтальной плоскости поплавка.

Косые прорезы в кольцеобразном выступе (рис. 130) заставляют поплавок при прохождении потока вращаться вокруг вертикальной оси, что центрирует поплавок внутри трубы, не позволяя соприкасаться со стенками, и повышает его чувствительность.

Кроме того, вращение поплавка является средством контроля за состоянием прибора, указывая на отсутствие трения и засорения. Вращательное движение поплавка гораздо чувствительнее к вредным сопротивлениям, чем поступательное, а поэтому остановка вращения поплавка заблаговременно сигнализирует о начинающихся неполадках и необходимости осмотра и чистки прибора.

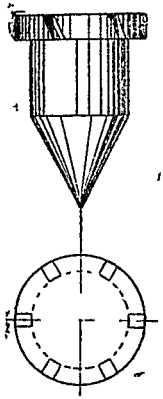


Рис. 130. Поплавок ротаметра.

Для получения равномерной шкалы внутренняя поверхность стеклянной трубки шлифуется по параболоиду вращения, так как только у параболоида приращение площади сечения, нормального к его оси, на единицу длины оси составляет постоянную величину.

Ввиду невозможности получить строго геометрическую форму внутренней поверхности трубы шкалы ротаметров градуируются экспериментально для каждого данного вещества при определенной температуре и давлении. Показания ротаметра будут точными лишь в том случае, если измерение им производится при градуировочных температуре и давлении. Если измеряемое вещество протекает через ротаметр при давлении и температуре, отличающихся от градуировочных, то показания ротаметра необходимо пересчитывать.

Для пересчета следует пользоваться формулой:

$$V_{пр} = V \sqrt{\frac{T_к}{T_и}} \cdot \sqrt{\frac{p_и}{p_к}}, \qquad (111)$$

где $V_{пр}$ — значение расхода газа, приведенное к условиям градуирования;

V — расход газа, указанный прибором;

$T_к$ — температура градуировки в °К;

$T_и$ — температура при измерении в °К;

$p_и$ — давление при измерении (абсолютное);

$p_к$ — давление градуировки (абсолютное).

Как указано, градуировка действительна лишь для того вещества, на которое изготовлен прибор. Для измерения другого вещества, отличающегося по плотности, также необходимо вводить поправку на плотность по формуле:

$$V_{пр} = V \sqrt{\frac{\gamma_п}{\gamma_и}}, \qquad (112)$$

где $\gamma_п$ — плотность вещества, на которое градуирован прибор;

$\gamma_и$ — плотность измеряемого вещества.

Понятно, что заменять вещество, на которое градуирован прибор, другим можно только в случае одинакового агрегатного состояния, т. е. одну жидкость можно заменять с вышеуказанной поправкой другой и один газ другим. При использовании ро-

таметра, градуированного для жидкости, для измерения газа шкала должна быть градуирована заново.

Точность и чувствительность прибора могут быть выяснены из следующих соображений. Предположим, что при данном количестве протекающего через ротаметр вещества при перемещении поплавка в положения z_1, z_2, z_3... z возникают действующие на него внешние направляющие силы P_1, P_2, P_3... P^{11}. Величины этих сил определяются изменениями величины кольцевых проходов и убывают по мере увеличения высоты подъема, ассимптотически приближаясь к осям координат (рис. 131). Другие силы, Q, являющиеся внутренними направляющими силами, противодействуют первым и остаются в данном приборе постоянными, равными весу поплавка. На чертеже эти силы изобразятся прямой, параллельной оси абсцисс. Для равновесия поплавка необходимо равенство внешних и внутренних направляющих сил, направленных в противоположные стороны. На чертеже это соответствует точкам пересечения кривых *I*, *II*, *III* с прямой *IV*. В случае произвольного отклонения поплавка под действием какой-либо возмущающей силы должна возникнуть сила, стремящаяся вернуть поплавок в первоначальное положение.

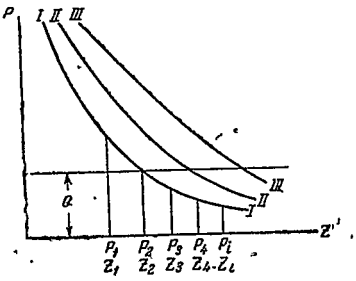


Рис. 131. Диаграмма усилий, действующих на поплавок ротаметра.

Эту силу можно представить как разность между приращениями сил P и Q, т. е.:

$$R = \frac{dQ}{dz} - \left(-\frac{dP_i}{dz}\right) = \frac{\Delta P_i}{dz}, \tag{113}$$

так как $\frac{dQ}{dz} = 0$ при $Q = \text{const}$.

Из уравнения расхода ротаметра:

$$G = k\,Fz\sqrt{2g\,\gamma\,\frac{Q}{f}}\ кг/сек, \tag{114}$$

где G — весовой расход вещества;
F — площадь сечения трубы в месте нахождения поплавка;
z — относительный подъем поплавка, отнесенный к рабочей длине стекла прибора;
g — ускорение силы тяжести;
γ — плотность вещества;
Q — вес поплавка ротаметра;
f — площадь поперечного сечения поплавка.

Заменяя Q через P_i, получим:

$$G = kFz\sqrt{2g\gamma\,\frac{P_i}{f}}. \tag{115}$$

или:

$$\frac{G}{z\sqrt{P_i}} = \frac{kF\sqrt{2g\gamma}}{\sqrt{f}} = C = \text{const}, \tag{116}$$

отсюда:

$$P_i = \frac{G^2}{C^2 z^2}. \tag{117}$$

Дифференцируя это выражение по z, получим отклоняющую силу от изменения положения поплавка:

$$R_1 = \frac{dP_i}{dz} = \frac{G^2}{C^2}\left(-\frac{2\,dz}{z^3}\right) = -\frac{2P_i}{z}. \qquad (118)$$

Для значений z, близких к положению равновесия, можно принять $P_i = Q$, а потому:

$$R_1 = -\frac{2Q}{z}, \qquad (119)$$

т. е. отклоняющая сила обратно пропорциональна величине относительного подъема поплавка ротаметра.

При неизменном положении поплавка, но при произвольном увеличении расхода также возникнет некоторая сила:

$$R = \frac{dQ}{ds} - \left(-\frac{dP_i}{ds}\right) = \frac{dP_i}{ds}; \qquad (120)$$

из уравнения (117) снова получим:

$$R_2 = \frac{dP_i}{ds} = \frac{2\,G}{C^2 z^2} = \frac{2P_i}{G}. \qquad (121)$$

или для положений, близких к равновесию $P_i = Q$, получим:

$$R_2 = \frac{2Q}{G}, \qquad (122)$$

т. е. отклоняющая сила обратно пропорциональна весовому количеству протекающего через ротаметр вещества. Следовательно, абсолютная точность прибора тем выше, чем меньшее количество вещества через него протекает. Из уравнения (121) можно заключить, что действие отклоняющей силы R_2 на поплавок, имеющееся в результате его движения, возможно лишь в случае увеличения G на величину ΔG, причем:

$$R_2(G + \Delta G) = 2(P_i + \Delta P_i) \qquad (123)$$

или

$$\frac{\Delta G}{G} = \frac{dP_i}{P_i}. \qquad (124)$$

Правая часть равенства (124) представляет относительное изменение силы P_i, а левая — относительное изменение количества вещества. Если второе остается постоянным, то должно быть постоянным и первое, а это означает сохранение постоянной относительной точности прибора на всем диапазоне шкалы.

Таким образом, ротаметры являются приборами с высокой устойчивостью и точностью показаний, причем эти свойства не зависят ни от длины шкалы, ни от веса поплавка.

Ротаметры изготовляются в чрезвычайно большом количестве типо-размеров, приспособленных к самым разнообразным условиям измерения, начиная с лабораторных приборов пропускной способностью от 0,05 *л/час* до промышленных приборов на 10 000 *м*³/*час*. Приборы большей производительности изготовляются по особому заказу.

Ротаметры обычно включаются в вертикальный трубопровод и должны устанавливаться строго по отвесу. На рис. 132 изображена нормальная конструкция ротаметра для вертикального трубопровода 150 *мм* диаметром. Недостатком обычных типов ротаметров является невозможность регистрации показаний и передачи их на расстояние, а также малая четкость показаний, отсчитываемых по вытравленной на трубке шкале, и затруднительность измерений расхода темных непрозрачных жидкостей.

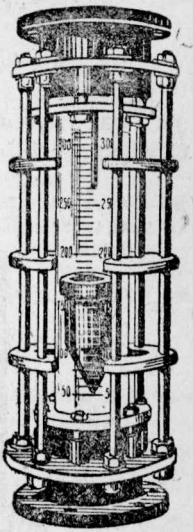


Рис. 132. Нормальная конструкция ротаметра.

Эти недостатки устраняются применением специальных типов ротаметров с магнитными указателями. Эти ротаметры имеют фарфоровые, пластмассовые или металлические, из немагнитного металла, измерительные трубы, в поплавок которых заделан сердечник из мягкого железа. Снаружи трубу охватывает сильный подковообразный магнит, укрепленный на рычаге и точно уравновешенный относительно оси вращения. Магнитная система снабжена указательной стрелкой, движущейся по дугообразной шкале, или соединена с пером регистрирующего механизма (рис. 133). Эта система позволяет применить также какой-либо из видов телепередатчиков.

Уравновешенная и легко подвижная магнитная система следует за перемещениями железного сердечника поплавка, указывая величину расхода.

Перепад давления, необходимый для работы ротаметров, весьма мал, составляя в зависимости от величины прибора от 5 до 50 *мм* вод. ст. Для ротаметров средних производительностей от 1000 до 4000 *л/час* требуемый перепад давления равен 15—25 *мм* вод. ст.

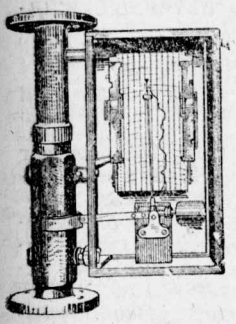


Рис. 133. Регистрирующий ротаметр.

Все описанные выше типы ротаметров относятся к так называемым приборам в главном потоке, так как через прибор проходит все количество вещества, подлежащее измерению.

Ротаметры также широко применяются в качестве парциальных расходомеров. Ротаметр при этом объединяется в одно целое с диафрагмой, включаемой в главный трубопровод. Перепад давления, создаваемый диафрагмой, заставляет течь через ротаметр небольшую часть потока (около 0,001 всего расхода). Шкала же ротаметра градуируется на величину всего расхода. Эти приборы рассчитаны на перепады давлений 3—100 *мм* вод. ст. На рис. 134 изображен парциальный ротаметр для горизонтального трубопровода.

Ротаметры изготовляются для измерения расхода газов: воздуха, светильного газа, аммиака, ацетилена, водорода, хлора, сернистого газа, углекислоты, азота, окислов азота, метана

и др.; жидкостей: соляной, серной, азотной, уксусной кислот, растворов едкого кали и натра, соды, аммиака, спиртов, эфира, нефти, бензина, масел и т. п. и паров: водяных, кислотных, спиртовых, эфирных.

27. Гидростатические расходомеры

Кроме описанных приборов иногда используются расходомеры, работающие по методу водослива, называемому также гидростатическим методом. Этот метод применяется в химиче-

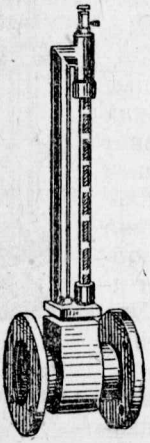


Рис. 134. Парциальный ротаметр.

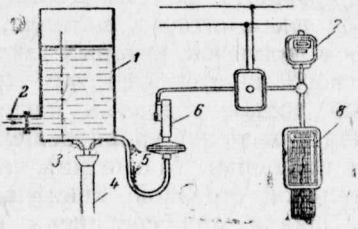


Рис 135. Сопловый расходомер Эккардта:

1 — сосуд; *2* — подводящая труба; *3* — сопло; *4* — отводящий трубопровод; *5* — соединительная трубка; *6* — мембранный манометр; *7* — суммирующий прибор; *8* — регистрирующий прибор.

ских производствах для измерения расхода особо активных жидкостей.

Расходомеры этого класса основаны на измерении величины подпора жидкости при свободном вытекании ее через сопло или водослив той или иной формы.

Сопловый расходомер Эккардта. Расходомер Эккардта (рис. 135) состоит из цилиндрического сосуда *1* с подводящей жидкость трубой *2*. В дне сосуда установлено сопло *3*, через которое жидкость может свободно вытекать в воронку отводящего трубопровода *4*. К дну сосуда подведена трубка *5*, соединяющая его с чувствительным мембранным манометром *6*, измеряющим высоту уровня жидкости в сосуде. Манометр установлен так, что мембрана находится на уровне выходного отверстия сопла.

Внутри сосуда установлена перегородка из двойного слоя сетки, играющая роль фильтра, устраняющего возможность засорения сопла и струеуспокоителя, гасящего турбулентные потоки внутри сосуда, обеспечивая плавный подход жидкости к соплу.

Манометр *6* имеет электропередатчик, передающий значение высоты уровня регистрирующему аппарату *8* и суммирующему счетчику *7*.

Прибор сменой сопла может быть применен для широкого диапазона расходов, а простота конструкции дает возможность изготовления прибора из любого коррозиоустойчивого материала, а следовательно, применения прибора для измерения расхода весьма активных жидкостей.

Расход при свободном истечении из сопла определяется известной формулой:

$$Q = 4{,}43\ k f \sqrt{h}, \qquad (125)$$

где Q — расход в $м^3/сек$;
k — коэфициент расхода сопла;
f — сечение сопла в $м^2$;
h — высота столба жидкости над отверстием сопла в $м$.

Для получения равномерной шкалы и планиметрируемой диаграммы необходимо устройство для извлечения квадратного корня, что в данном расходомере осуществляется электрической схемой.

Расходомер надежен в работе и дает погрешность вместе с погрешностями электропередатчика не больше $\pm 2{,}5\%$ измеренной величины.

Расходомеры Эккардта могут быть снабжены электрическими передатчиками показаний на расстояние и регистрирующими приборами. На рис. 135 изображена установка с дальнодействующим передатчиком, соединенным со вторичными приборами: указывающим и регистрирующим.

Недостатки прибора общие для всех приборов этого класса — невозможность включения в трубопровод, работающий под давлением, и непригодность для измерения окисляющихся и легко летучих жидкостей ввиду свободного доступа воздуха.

Кислотомер системы Шишелова принадлежит к расходомерам того же типа, как расходомер Эккардта, с тем отличием, что истечение жидкости идет через простое отверстие в дне сосуда. Другим отличием является способ измерения высоты столба жидкости.

Прибор (рис. 136) состоит из цилиндрического свинцового сосуда *1* с плоским дном и конической крышкой, окруженного по нижнему краю закрытой кольцевой полостью *2*, соединенной с внутренностью сосуда *1* отверстием *3*. Кольцевая камера трубой *4* соединяется с чувствительным манометром любого типа. В дне сосуда *1* сделано круглое отверстие для слива *5*, а в крышке имеется патрубок *6* для подачи жидкости. Внутри сосуда *1* ниже отверстия подающего патрубка помещен конический зонт *7*, устраняющий удар струи по сливному отверстию.

Во время работы прибора, в зависимости от величины расхода, в сосуде *1* устанавливается некоторая высота уровня жидкости. Давление этого столба жидкости передается в кольцевую камеру, сжимая находящийся там воздух. Давление воздуха, соответствующее положению уровня жидкости в сосуде *1*, измеряется манометром.

Это давление очевидно равно:

$$p = (H - h)\gamma, \qquad (126)$$

где H — высота столба жидкости в сосуде *1*;
h — высота жидкости в кольце *2*;
γ — плотность жидкости.

Прибор весьма прост и доступен для изготовления любым заводом. Недостатки прибора заключаются в квадратичности шкалы, зависимости от атмосферного давления и удельного веса жидкости, неточности измерений вследствие колебаний верхнего зеркала жидкости от удара струи, отсутствия выравнивания потока у подхода к отверстию и зависящего от этого непостоян-

ства коэфициента расхода. В результате указанных недостатков прибора погрешность измерений составляет ± 5% измеренного расхода. Прибор должен градуироваться экспериментально, так как коэфициенты истечения из отверстия не установлены достаточно точно. Целесообразнее была бы замена отверстия соплом, что повысило бы точность измерений.

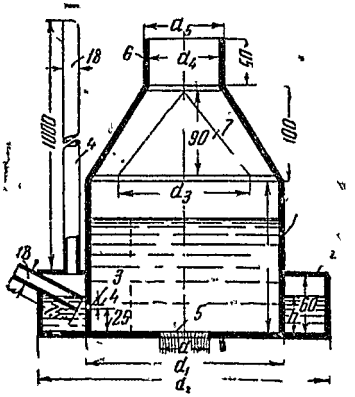


Рис. 136. Кислотомер Шишелова:

1—свинцовый сосуд; *2*—кольцевая полость; *3* — соединяющее отверстие; *4* — трубка к манометру; *5* — сливное отверстие; *6* — входной патрубок; *7* — зонт.

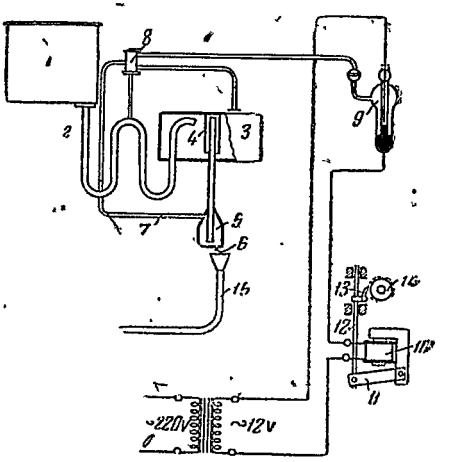


Рис. 137. Усовершенствованный кислотомер Шишелова:

1 — напорный бак; *2* — W-образная труба; *3* — измерительный сосуд; *4* — сифон; *5* — сливной сосуд; *6* — отверстие; *7* — соединительная труба; *8* — распределитель; *9* — ртутный контактный манометр; *10* — электромагнитное реле; *11* — якорь реле; *12* — шток якоря; *13* — собачка; *14*—храповое колесо; *15*—сливная труба.

Более совершенным является второй вариант кислотомера Шишелова (рис. 137). Он состоит из напорного бака *1*, откуда по W-образной трубе *2* жидкость перетекает в измерительный сосуд (мерник) *3*. По наполнении мерника доверху сифон *4* начинает автоматически действовать, сливая жидкость в сосуд *5* с отверстием *6* в его дне. Подпор жидкости, образующийся в сосуде *5* вследствие неравенства притока и оттока жидкости, сжимает воздух, находящийся в сосуде *5*. Давление воздуха передается по трубе *7* через распределитель *8* в верхнее колено W-образной трубы *2*, прерывая этим дальнейшую подачу жидкости в мерник и в ртутный контактный манометр *9*, вызывая замыкание цепи реле счетчика. Катушка электромагнита реле *10* притягивает якорь *11*. Соединенный шарнирно с якорем шток *12* собачкой *13* поворачивает храповое колесо *14* на один зубец, отсчитывая опорожнение мерника *3*.

Жидкость, вытекающая из сосуда *6* через воронку и трубопровод *15*, удаляется по назначению. По опорожнении мерника *3*

и сосуда *5* давление воздуха падает, реле обесточивается и якорь под действием своего веса отпадает, переставляя собачку. Одновременно восстанавливается подача жидкости в мерник *3* для нового цикла.

Прибор, таким образом, отсчитывает число опорожненных мерников при постоянном объеме каждой порции.

Принцип свободного истечения жидкости из отверстия использован здесь не для непосредственного измерения, а для действия своеобразного пневматического реле, дающего импульс для работы всей системы. Поэтому данный расходомер следует отнести к группе объемных порционирующих приборов (стр. 81).

Диапазон измерений этим прибором 1 : 3. Приборы строятся на производительность 2—6, 3—9 и 5—15 *м³/час*. Точность прибора довольно высока. По литературным данным погрешность прибора не превышает + 0,5% от измеренного расхода.

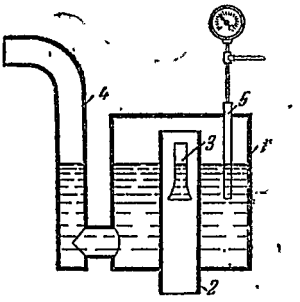


Рис. 138. Кислотомер УГИПХ:

1 — сосуд кислотомера; *2* — сливная труба; *3* — сливная щель; *4* — подающая труба; *5* — пневматический уровнемер.

Кислотомер УГИПХ. Кислотомер УГИПХ (рис. 138) принадлежит к числу приборов со свободным сливом через отверстие в вертикальной стенке. Прибор состоит из закрытого бачка *1*, в дно которого вделана выпускная труба *2*; в стенке трубы прорезана щель *3* с параболическими очертаниями боковых граней. Кислота подается в бачек *1* по трубе *4* и свободно изливается через щель *3*. Высота подпора, служащая показателем величины расхода, измеряется пневматическим уровнемером *5*.

Форма щели водослива исправляет квадратичную зависимость расхода, приближая ее к линейной. Уровнемер может быть снабжен регистрирующим аппаратом и электропередатчиком.

Кислотомер изготовляется на любую величину расхода. Точность измерения зависит от чувствительности уровнемера и постоянства плотности жидкости. Практически погрешность может быть доведена до ± 1,5%. Прибор нуждается в индивидуальной градуировке. Простота устройства позволяет изготовлять его местными средствами.

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

ИЗМЕРИТЕЛИ ТЕМПЕРАТУР

ГЛАВА VI

ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ. ТЕРМОМЕТРЫ РАСШИРЕНИЯ

28. Общие сведения. Температурные шкалы

Измерение температур в химических производствах. В химических производствах температура является важнейшей величиной, измерение и регулирование которой определяет правильность и успех производственного процесса. С точки зрения термометрии химические производства отличаются тем, что имеют весьма широкие пределы температур, подлежащих измерению.

Интервал температур, имеющих место в химических производствах, начинается от температуры кипения жидкого кислорода (—183°) и заканчивается максимальной температурой карбидной электропечи (+2500°).

Столь значительный диапазон температур требует применения разнообразных методов измерения и большого ассортимента измерительных приборов. И на самом деле, в химической промышленности применяются почти все известные типы термометрических приборов.

Приборы для измерения температур носят общее название термометров и пирометров. Деление измерителей температуры на термометры и пирометры чисто условно. Термометрами называются приборы, измеряющие температуру до +550°, а пирометрами — приборы для измерения температур выше 550°.

Прежде чем перейти к описанию измерительной методики и аппаратуры, следует установить понятия температуры и единиц ее измерения. Температура есть проявление теплового состояния тел, которое правильнее всего определить как степень нагретости данного тела. Температура не находится в прямой зависимости от количества тепла, так как два тела, содержащие одно и то же количество тепла, могут иметь различную температуру и, наоборот, тела, имеющие одну и ту же температуру, могут содержать различные количества тепла. Температура есть величина, определяющая направление перехода тепла без затраты работы от одного тела к другому. Тепло при этом условии всегда переходит от тела с высокой температурой к телу с температурой более низкой.

Из этих определений вытекает, что температура не может быть выражена в абсолютных единицах измерений и представляет собой безразмерную величину.

Измерение температуры возможно лишь сравнением степени нагретости двух тел, из которых одно имеет степень нагретости, принимаемую за начальную. Сравнение степени нагретости производят по изменению какого-либо физического свойства тела, зависящего от температуры и легко поддающегося измерению.

Температурная шкала представляет собою ряд точек, распределенных равномерно в определенном интервале, ограниченном выбранными основными точками, называемыми главными реперами шкалы. Равновеликие деления продолжаются и в обе стороны за главными реперами. За единицу измерения принимается градус температуры, представляющий определенную долю интервала между основными точками. Градус обозначается обычно значком ° справа от значащей цифры, кроме того, к значащей цифре справа приписывается буква, обозначающая название температурной шкалы, по которой установлено числовое значение температуры.

В настоящее время в СССР к обязательному применению принята международная шкала, установленная международным соглашением в 1933 г. Основными точками этой шкалы являются: температура равновесия между льдом и насыщенной воздухом водой, обозначаемая 0°, и температура равновесия между водой и ее насыщенным паром, обозначаемая 100°. Интервал между этими точками делится на сто равных частей — градусов. Точная величина градуса устанавливается по водородному газовому термометру.

Температуры обеих основных точек принимаются при давлении 760 *мм* рт. ст. (плотность ртути 13,5951 $г/см^3$) и ускорении силы тяжести 980,665 $см/сек^2$. Международная шкала обозначается буквами *С* или *I*. Одновременно в научной и технической литературе встречаются иные, исторически сложившиеся температурные шкалы.

Шкала Фаренгейта (1715 г.). Температура таяния льда обозначается отметкой 32, температура кипения воды 212; интервал между этими точками делится на 180 частей. Шкала Фаренгейта до сих пор сохранилась в Англии и США. Обозначается буквами Ф или *F*.

Шкала Реомюра (1730 г.). Температура таяния льда обозначается отметкой 0, температура кипения воды 80; интервал между этими отметками делится на 80 частей. Шкала Реомюра в настоящее время не имеет применения. Обозначается буквами Р или *R*.

Шкала Цельсия (1742 г.). Температура таяния льда обозначается отметкой 0, температура кипения воды 100; интервал между ними делится на 100 частей — градусов. Шкала Цельсия (ртутного термометра) практически весьма близка к международной шкале и применяется наравне с нею. Обозначается буквами Ц или *С*.

Недостаток перечисленных шкал заключается в том, что промежуточные показания термометра зависят от природы тел, используемых для измерения температуры.

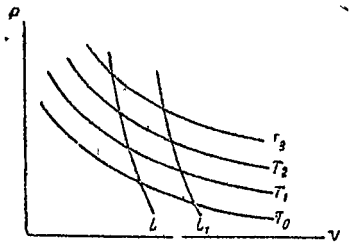


Рис. 139. *p—V*-диаграмма.

Абсолютная шкала температур Кельвина (1848 г.), построенная на основании второго закона термодинамики, характеризуется тем, что промежуточные показания термометра по этой шкале не зависят от физических свойств тела, которым пользуются для измерения температуры. Шкала Кельвина обозначается буквой К.

Абсолютная шкала температур строится на основании следующих соображений. На диаграмме *pv* (рис. 139) проведем две адиабаты L и L_1 и ряд изотерм T_0, T_1, T_2, T_3,.. и т. д. Одной из этих изотерм придадим определенное значение. Положим, например, $T_0 = 273$. Для всех обратимых процессов рассматриваемых циклов будем иметь:

$$\frac{T_1}{T_0} = \frac{Q_1}{Q_0}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{Q_2}{Q_1}; \quad \frac{T_3}{T_2} = \frac{Q_3}{Q_2} \text{ и т. д.,} \tag{127}$$

отсюда

$$T_1 = T_0 \frac{Q_1}{Q_0}; \quad T_2 = T_1 \frac{Q_2}{Q_1}; \quad T_3 = T_2 \frac{Q_3}{Q_2} \text{ и т. д.} \tag{128}$$

Имея значение T_0, можно из этих соотношений найти значения всех остальных температур.

Положим далее, что изотермы проведены через равные температурные промежутки, т. е. что $T_1 - T_0 = T_2 - T_1 = T_3 - T_2 = \ldots$,

тогда:

$$Q_1 - Q_0 = Q_2 - Q_1 = Q_3 - Q_2 = \ldots \tag{129}$$

Иначе говоря, работы, полученные при циклах Карно с равными температурными промежутками, равны между собой. Графически это выразится в равенстве площадей между соответствующими изотермами.

Если принять температурные интервалы равными 1°, т. е.:

$$T_1 - T_0 = T_2 - T_1 = T_3 - T_2 = \ldots = 1°, \tag{130}$$

то, зная, что для идеального газа:

$$\frac{T_1 - T_0}{T_1} = \eta_1; \quad \frac{T_2 - T_1}{T_2} = \eta_2; \quad \frac{T_3 - T_2}{T_3} = \eta_3 \text{ и т. д.,}$$

получим:

$$1 = \eta_1 \; T_1 = \eta_2 \; T_2 = \eta_3 \; T_3 = \ldots \tag{131}$$

ели:

$$T_1 = \frac{1}{\eta_1}; \quad T_2 = \frac{1}{\eta_2}; \quad T_3 = \frac{1}{\eta_3} = \ldots \qquad (132)$$

Таким образом, температура всякого тела, играющего роль нагревателя, равна обратному значению коэфициента полезного действия обратимого процесса, протекающего между этим телом и другим, имеющим температуру на 1° ниже.

Мы видим, что, исходя из общих законов термодинамики, можно построить температурную шкалу, отвлекаясь от физических свойств тел. Однако практически осуществить эту шкалу невозможно. Наиболее близко к теоретической, абсолютной шкале подходит шкала водородного или гелиевого термометра, который и применяется для научных работ и проверки эталонных приборов.

При измерении температур температурам выше нуля придают значение положительных величин, а ниже нуля — отрицательных. При записи отрицательной температуры перед числовым обозначением ставят знак — (минус).

Для перевода значения температуры, измеренной по одной шкале, в значение по другой шкале пользуются следующими соотношениями:

$$t^\circ \text{C} = \frac{5}{9}(t^\circ \Phi - 32^\circ) = \frac{5}{4}\, t^\circ \text{P}. \qquad (133)$$

$$t^\circ \text{P} = \frac{4}{9}\,(t^\circ \Phi - 32^\circ) = \frac{4}{5}\, t^\circ \text{C}. \qquad (134)$$

$$t^\circ \text{K} = t^\circ \text{C} + 273. \qquad (135)$$

Основные точки международной шкалы. Для проверки и градуирования термометрических приборов, рассчитанных на большие пределы измерений, указанных выше двух основных точек недостаточно. Поэтому международной конференцией в 1927 г. были установлены шесть основных точек температурной шкалы, охватывающих диапазон температур от —183° до 1063°С. Этими точками являются:

1) Температура равновесия между жидким и парообразным кислородом при давлении, равном нормальной атмосфере, —182,97°. При ином давлении, равном p:

$$t_p = -182{,}97 + 0{,}0126\,(p - 760) - 0{,}0000065\,(p - 760)^2. \qquad (136)$$

2) Температура равновесия между льдом и насыщенной воздухом водой при давлении одной нормальной атмосферы равняется 0,000°.

3) Температура равновесия между водой и ее насыщенным паром при давлении, равном нормальной атмосфере, равняется +100,000°. При давлении, равном p:

$$t_p = 100{,}000 + 0{,}0367\,(p - 760) - 0{,}000023\,(p - 760)^2. \qquad (137)$$

4) Температура равновесия между жидкой серой и ее насыщенным паром при давлении, равном нормальной атмосфере, равняется +444,6°. При давлении p:

$$t_p = 444{,}6 + 0{,}0909\,(p - 760) - 0{,}000048\,(p - 760)^2. \qquad (138)$$

5) Температура равновесия между жидким и твердым серебром при давлении, равном нормальной атмосфере, равняется 960,5°.

6) Температура равновесия между жидким и твердым золотом при давлении, равном нормальной атмосфере, равняется 1063,0°.

Нормальная атмосфера есть давление ртутного столба высотой 760 *мм* при плотности ртути 13,5951 *г/см*^{3} и ускорении силы тяжести 980,665 *см/сек*^{2}.

Газовый термометр. В газовом термометре для измерения температуры используют либо изменение объема газа при постоянном давлении в зависимости от температуры, причем шкала градуируется на основании соотношения:

$$t = 100\,\frac{v - v_0}{v_{100} - v_0}, \qquad (139)$$

либо, что гораздо удобнее, изменение давления газа при постоянном объеме; шкала при этом градуируется на основании соотношения:

$$t = 100\,\frac{p - p_0}{p_{100} - p_0}. \qquad (140)$$

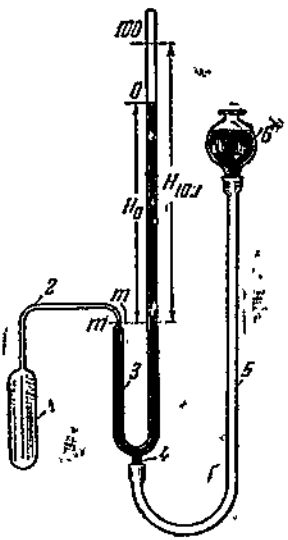


Рис. 140. Схема газового термометра:

1 — сосуд термометра; *2* — капиллярная трубка; *3* — U-образная барометрическая трубка; *4* — отросток; *5* — резиновая трубка; *6* — напорный сосуд.

На рис. 140 дана схема газового термометра постоянного объема. Термометр состоит из сосуда *1*, изготовленного из кварца или металлического сплава (платино-родий, платино-иридий), капиллярной трубки *2* и U-образной трубки *3*, короткое колено которой соединено с капилляром *2*, а длинное запаяно. На нижней перемычке U-образной трубки имеется отросток *4*, соединенный резиновой толстостенной трубкой *5* с сосудом *6*. U-образная трубка *3* и сосуд *6* заполнены ртутью. На капиллярной трубке *2* в месте ее присоединения к U-образной трубке *3* нанесена отметка *m*. Сосуд *1* заполнен газом; над ртутью в длинном колене U-образной трубки барометрический вакуум. Поднимая или опуская сосуд *6*, мениск ртути в коротком колене можно подвести к отметке *m*; тогда абсолютное давление газа в сосуде *1* будет равно высоте столба ртути в длинном колене, считая от отметки *m*.

Погружая сосуд *1* в тающий лед и приведя уровень ртути к отметке *m*, отмечаем давление газа по высоте столба ртути до отметки *0*, далее, погружая сосуд *1* в пары кипящей воды, найдем новое, большее давление (отметка 100); расстояние между этими отметками делим на сто равных частей, продолжая деления вверх и вниз от этих отметок.

В градуировку газового термометра приходится вносить поправки на отклонения реальных газов от законов Бойля—Мариотта и Гей-Люссака, на расширение сосуда, на изменение удельного веса ртути и т. д. Поэтому работа с газовым термометром чрезвычайно сложна и применение его ограничивается специальными лабораторными работами.

Классификация технических термометров. Для технических и производственных измерений применяются приборы, позволяющие быстро и без особых предосторожностей получать с достаточной для практики точностью значение искомой температуры.

К производственным термометрам и пирометрам предъявляются требования простоты конструкции, возможно малых размеров, достаточной чувствительности, достаточной точности, наглядности показаний и возможности наблюдений в наиболее удобном для обслуживающего персонала месте, независимо от расположения точки измерения.

Применяемые в химической производственной практике приборы для измерения температур (термометры и пирометры) можно разделить на следующие группы:

Термометры расширения, подразделяющиеся на дилатометрические, основанные на изменении объема или линейных размеров тел в зависимости от изменения температуры, и манометрические, основанные на изменении давления жидкости, пара или газа.

Термоэлектрические пирометры, основанные на возникновении э. д. с. при нагревании спая разнородных проводников.

Термометры сопротивления, основанные на изменении электрического сопротивления проводников.

Пирометры излучения, подразделяющиеся на пирометры полного излучения, основанные на нагревании тел лучеиспусканием, и пирометры частичного излучения, основанные на изменении яркости свечения тел в зависимости от температуры.

29. Дилатометрические термометры

Приборы, основанные на расширении твердых тел. При изменении температуры все твердые тела изменяют свои линейные размеры. Если длина какого-либо тела при 0° равна L_0, то при температуре $t°$ длина этого тела L_t будет:

$$L_t = L_0 (1 + \alpha t), \qquad (141)$$

где α — средний линейный коэфициент расширения для интервала температур, в котором лежит t. Средние коэфициенты линейного расширения твердых материалов, применяемых в термометрии, приведены в табл. 5 (стр. 160).

Средний объемный (кубический) коэфициент расширения твердых тел с достаточной точностью можно считать равным утроенному линейному коэфициенту:

$$\beta = 3\alpha. \qquad (142)$$

Термометры, основанные на расширении твердых тел, как самостоятельные приборы применяются чрезвычайно редко. Эти термометры используются либо в качестве регуляторов темпера-

Таблица 5

Коэфициенты линейного расширения материалов

Наименование материала	$\alpha \cdot 10^6$	Интервал температур
Алюминий 90%	23,8	0—100
Латунь (Cu 56,39; Zn 40,59; Sn 1,52; Fe 0,96%)	21,5—22,7	25—300
Серебро	19,6	0—300
Латунь (Cu 88—62; Zn 35—10; Pb 1,65—2,57%)	18,3—20,4	25—300
Красная медь	16,5	0—100
Алюминиевая бронза (Cu 92,2; Al 7,3; Zn 0,4%)	15,57	20—300
Никель 94—95%	12,9—13,5	25—100
Инвар (Fe 64; Ni 36; C 0,15)	0,9	0—150
Кварцевое стекло	0,4	0—100

туры, либо как компенсаторы температуры в других измерительных приборах.

Конструктивно термометры основаны на использовании разности линейного расширения двух тел, из которых одно обладает малым, а другое большим коэфициентом линейного расширения.

На рис. 141 представлено схематически устройство так называемого трубчатого биметаллического термометра. Термометр состоит из трубки *1*, сделанной из металла с большим коэфициентом линейного расширения (красная медь, алюминий, латунь). Внутри трубки по оси ее расположен стержень *2*, опирающийся на пробку *3*, ввинченную в конец трубки *1*. Стержень изготовлен из материала с малым коэфициентом линейного расширения (кварц, фарфор, инвар).

Трубка ввернута в головку *4*, в которой помещается передаточный механизм. На конец стержня *2* опирается рычаг *5*, имеющий неподвижную ось вращения *6*, укрепленную в головке. Рычаг нагружен сильной пружиной *7*, прижимающей рычаг *5* к стержню *2*, а этот последний к дну трубки *1*.

Рычаг *5* через промежуточную рычажную передачу *8* поворачивает ось *9* указывающей стрелки *10* по шкале *11*. Термометр ниппелем *12* головки ввинчивается в бобышку на стенке или крышке сосуда, температуру внутри которого необходимо измерить, так, чтобы трубка *1* была целиком погружена в измеряемую среду. При повышении температуры трубка удлиняется значительно больше, чем центральный стержень, вследствие чего конец *a* стержня перемещается вниз. Вместе с ним перемещаются вниз концы рычагов *5* и *8* и ведомая ими стрелка *10*, указывая на шкале температуру в градусах.

Другой вид биметаллического термометра состоит из плоской спирали, согнутой из полоски, состоящей из двух слоев разнородных металлов (медь—инвар). Обычно внутренний слой сделан из металла, имеющего больший коэфициент расширения. При повышении температуры внутренний слой расширяется больше наружного, вследствие чего спираль разгибается. Если внутренний конец спирали закрепить неподвижно, то наружный свободный конец спирали будет перемещаться по некоторой дуге, причем величина перемещения будет пропорциональна повышению температуры. При соединении свободного конца с указательной стрелкой получается прибор, указывающий температуру в градусах.

Как сказано выше, биметаллические термометры как самостоятельные приборы для измерения температуры не получили распространения в технике.

Жидкостные термометры. Измерение температуры жидкостными термометрами основано на различии коэфициентов расши-

рения жидкости и материала оболочки термометра. Жидкостный термометр состоит из небольшого сосуда, сделанного из стекла или кварца, переходящего в длинную капиллярную трубку, запаянную сверху. Сосуд и часть капилляра заполнены жидкостью. При нагревании объем жидкости увеличивается и столбик ее поднимается в капилляре соответственно повышению температуры. К трубке прикреплена шкала, разделенная на градусы температуры. В лабораторных приборах шкала часто наносится на самой трубке термометра.

В качестве рабочей жидкости в жидкостных термометрах применяется в зависимости от диапазона измерений температуры: пентан (пределы измерений от —180 до +20), спирт (пределы измерений от —70 до +120) и ртуть (пределы измерений от —39 до +750°).

Наибольшим распространением пользуется стеклянный ртутный термометр. В качестве термометрической жидкости ртуть обладает весьма ценными свойствами. Она не смачивает стекла, почти не окисляется, легко получается в химически чистом виде, имеет значительный интервал между точкой плавления и точкой кипения, обладает в пределах обычно измеряемых температур практически постоянным средним коэфициентом расширения.

Низшим пределом измерений ртутным термометром является температура —38,9° — точка затвердевания трути. Высшим пределом +550° — температура размягчения стекла. Температура кипения ртути под атмосферным давлением равна +357°, поэтому для повышения предела измерения до 550° пространство над ртутью в капилляре заполняют инертным газом—азотом при давлении 25 *кг/см*². Применение термометра из плавленого кварца и повышение давления инертного газа в капилляре до 60 *кг/см*² позволяет повысить предел измерения до +750°.

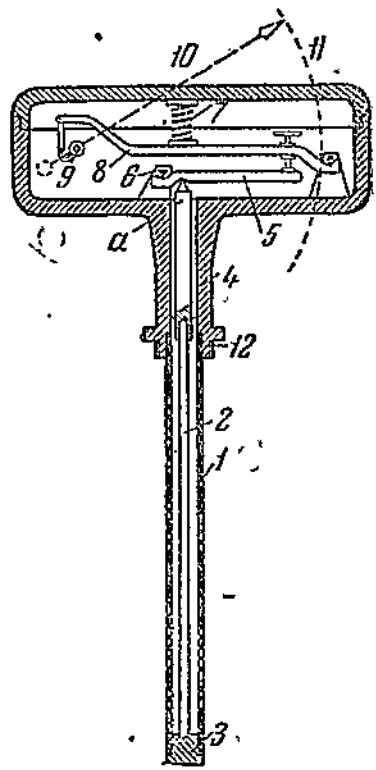


Рис. 141. Схема трубчатого биметаллического термометра:

1 — трубка термометра; *2* — внутренний стержень; *3* — пробка; *4* — головка; *5* — рычаг; *6* — ось рычага; *7* — пружина; *8* — промежуточный передаточный рычаг; *9* — ось стрелки; *10* — указывающая стрелка; *11* — шкала; *12* — ниппель; *a* — толкатель.

Существует огромное количество конструктивных разновидностей стеклянных ртутных термометров, приспособленных к различным специальным требованиям лабораторных работ, метеоро-

логических наблюдений, медицины и других отраслей науки, встречающихся с задачами измерения температур.

Производственная практика химической и других отраслей промышленности также предъявляет к ртутным термометрам специфические требования, важнейшими из которых являются четкость градусных делений и легкость отсчета показаний, прочность прибора, защищающая его от поломки при неосторожном обращении, и возможность герметического крепления термометра в аппаратах, работающих под давлением.

Существующие конструкции в большей или меньшей степени удовлетворяют этим требованиям.

Технические термометры имеют сосуд значительно большего объема и капилляр большего диаметра, что делает градусные деления более крупными, а столбик ртути более заметным. Стеклянные части технических термометров заключаются в прочную металлическую оправу (рис. 142), снабженную с лицевой стороны

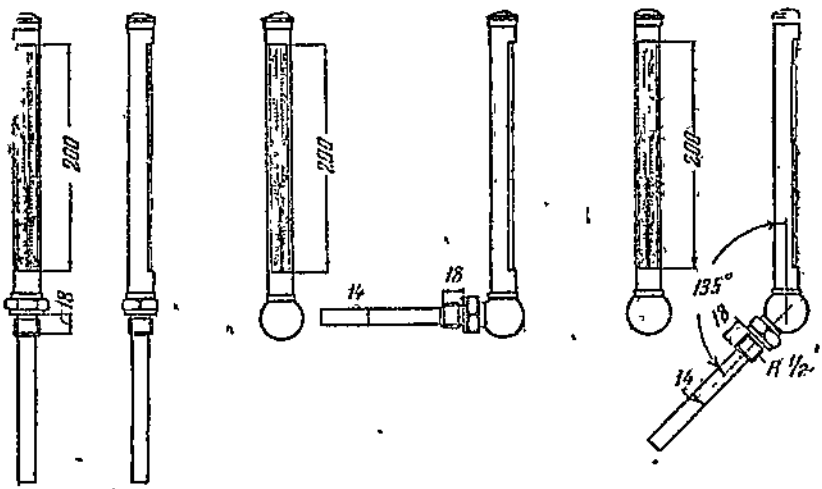


Рис. 142. Ртутные технические термометры.

окошком, закрытым стеклом, через которое и наблюдают показания температуры. Оправа термометра снабжена фланцем или винтовым ниппелем для крепления на трубопроводе или аппарате. Длина хвостовой части термометра, погружаемого в измеряемую среду, определяется размерами аппарата и условиями измерений и может колебаться от 100 до 2000 *мм*.

При установке на трубопроводе длина хвоста термометра определяется из соотношения:

$$l = 0{,}5\,(d + h), \qquad (143)$$

где l — длина хвостовой части;

d — диаметр трубопровода в месте установки термометра;

h — длина резервуара термометра.

Так как стеклянный резервуар термометрической трубки защищен глухим металлическим чехлом, то для повышения чувствительности термометра зазор между оправой и термометрической трубкой заполняют маслом (в термометрах со шкалой до ± 200°), ртутью (до +300°) или железными опилками (до 750°). Жидкость или железные опилки, заполняющие оправу, должны покрывать лишь активную часть (резервуар) термометрической трубки, так как слишком большое количество их увеличивает тепловую инерцию прибора и уменьшает точность измерений.

На рис. 142 схематически представлены прямые и угловые технические ртутные термометры с винтовыми ниппелями для крепления.

При заказе технических ртутных термометров обязательно надо указывать пределы шкалы, длину хвостовой части и способ крепления термометра (оправа с фланцем или с ниппелем).

Ртутные и другие жидкостные стеклянные термометры широко применяются в промышленности вследствие простоты устройства, дешевизны и относительно высокой точности показаний (погрешность ртутных термометров ± 1%, спиртовых ± 2,5% от предельного значения шкалы), однако они далеко не удовлетворяют требованиям современной техники контроля производства. Главнейшим недостатком их является невозможность регистрации показаний и передачи показаний на расстояние. Недостаточная четкость и наглядность шкалы и возможность вследствие этого ошибок в отсчете также понижают ценность этих приборов для целей производственного контроля.

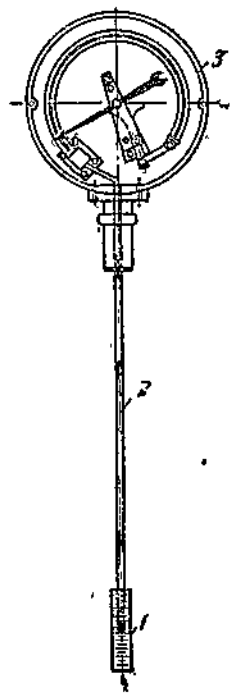


Рис. 143. Манометрический термометр:

1 — баллон термометра; *2* — капиллярная трубка; *3* — манометр.

30. Манометрические термометры

Манометрические термометры в значительной мере устраняют недостатки стеклянных жидкостных термометров. Измерение ими температуры основано на изменении давления жидкости или ее паров при изменении температуры.

Манометрический термометр (схема показана на рис. 143) состоит из следующих основных частей: металлического баллона *1*, металлической капиллярной трубки *2* и манометра *3*.

Баллон *1* манометрического термометра, отдельно изображенный на рис. 144, цельнотянутый, изготовляется из нержавеющей стали, монель-металла или латуни. Баллон закрыт впаянной пробкой *2*, через которую проходит капиллярная трубка *3*. Тонкостенная капиллярная трубка *3*, изготовляемая обычно из меди, во

избежание переломов покрыта толстой свинцовой оболочкой *4* и заключена в гибкую панцырную металлическую трубку *5*. К баллону прикреплен ниппель *6* с нарезкой, с помощью которого баллон термометра закрепляется в стенке аппарата или трубопровода.

По характеру заполнения системы различают: ж и д к о з а п о л н е н н ы е термометры, в которых вся система, т. е. баллон, капилляр и манометрическая капсула, заполнены жидкостью; п а р о з а п о л н е н н ы е термометры, в которых баллон частично заполнен жидкостью, все остальное пространство заполнено парами этой жидкости, и г а з о з а п о л н е н н ы е термометры, у которых термометрическая система заполнена инертным газом под некоторым давлением.

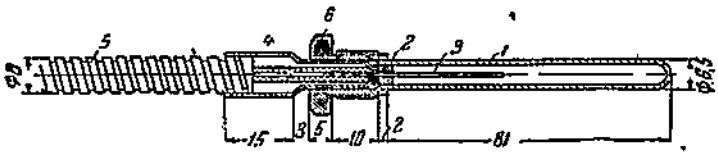


Рис. 144. Баллон манометрического термометра:

1 — баллон термометра; *2* — пробка баллона; *3* — капилляр; *4* — свинцовая обкладка; *5* — гибкая металлическая броня; *6* — нажимная букса.

В жидкозаполненных термометрах изменение давления в системе возникает за счет изменения объема жидкости при изменении температуры. В парозаполненных — вследствие изменения упругости пара и в газозаполненных — вследствие теплового расширения газа.

Манометрические термометры позволяют легко осуществить запись показаний; пользуясь ими, можно указывающую часть прибора держать вдали от точки измерения. Указание температуры стрелкой на шкале делает наблюдение и отсчет легким и простым. Цельнометаллическая конструкция прибора более устойчива к внешним воздействиям. Эти свойства манометрических термометров делают их весьма удобными эксплоатационными приборами, применимыми в большом числе случаев практики контроля производства.

Жидкозаполненные термометры заполняются под некоторым первоначальным давлением жидкостью, не обращающейся в пар в пределах измеряемого диапазона температур. Для заполнения применяются следующие жидкости:

Метиловый спирт для измерений в пределах	от	—164 до +150°
Ксилол	„	— 40 „ +400°
Ртуть	„	— 38 „ +550°

Баллон, капилляр и манометрическая капсула делаются из латуни, бронзы или никеля, а при заполнении ртутью из стали.

Жидкозаполненные термометры изготовляются с жестким и гибким соединением баллона с манометром.

На рис. 145 изображены ртутнозаполненный прямой термометр жесткой конструкции. Капиллярная трубка, соединяющая баллон с манометром, проходит внутри металлической колонки, связывающей корпус манометра с баллоном. Колонка в нижнем конце снабжена винтовым ниппелем для ввертывания термометра в бобышку аппарата или трубопровода.

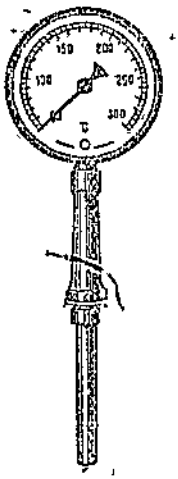


Рис. 145. Ртутнозаполненный термометр.

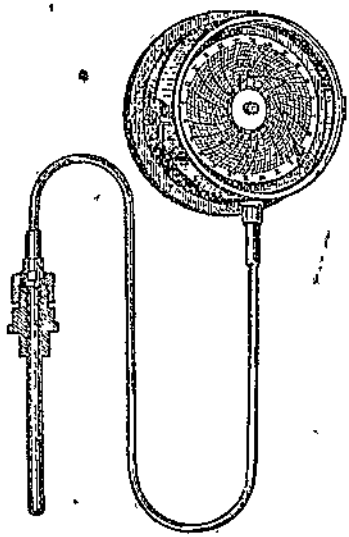


Рис. 146. Жидкозаполненный регистрирующий термометр с гибким капилляром.

На рис. 146 изображен регистрирующий жидкозаполненный термометр с гибким капилляром. В этом приборе манометрическая капсула приводит в движение вместо указательной стрелки рычаг с пером, записывающим на дисковой бумажной диаграмме колебания температуры. Бумажный диск вращается часовым механизмом, заключенным в корпусе манометра. Манометр соединен с баллоном гибкой капиллярной трубкой, позволяющей отнести указывающую часть прибора от точки измерения, поместив ее в месте, наиболее удобном для наблюдения и обслуживания. Длина гибкой капиллярной трубки у жидкозаполненных термометров может быть от 1 до 10 *м*.

Существенным недостатком жидкозаполненного термометра является влияние температуры соединительной капиллярной трубки на показание термометра. Для уменьшения этой ошибки объем баллона делают в несколько раз большим объема капилляра, однако при длинной капиллярной трубке (6—10 *м*) эта ошибка делается заметной, превышая допустимые пределы. Для ее устранения термометр выполняют с двумя капиллярными трубками и двойной манометрической системой. Вторая капил-

лярная трубка идет параллельно основной, непосредственно соприкасаясь с нею. Компенсационный капилляр в конце заглушен и не соединяется с баллоном термометра. Компенсационный капилляр, так же как основной, заполнен жидкостью и присоединен ко второй манометрической капсуле. Передаточный механизм устроен так, что перемещение основной пружины, вызванное изменением температуры жидкости в главном капилляре, компенсируется действием второй пружины. Поскольку температура жидкости в обоих капиллярах будет всегда одинаковой, колебания ее не будут отражаться на показаниях термометра.

Применение компенсационного капилляра необходимо в тех случаях, когда температура окружающей среды может значительно колебаться, а также при длинном капилляре термометра.

Так как изменение объема жидкости при нагревании является линейной функцией температуры, жидкозаполненные термометры имеют равномерную шкалу, что представляет значительное удобство при наблюдении.

Парозаполненные термометры. Только часть баллона этих термометров занимает жидкость, остальное пространство термометрической системы заполнено насыщенным паром этой жидкости. Количество жидкости, находящейся в баллоне, должно быть таким, чтобы при наивысшей температуре, измеряемой термометром, в баллоне оставалась неиспарившаяся жидкость.

В парозаполненных термометрах применяются:

Хлористый этил для измерения	в	пределах	от	0	до + 65°
Хлористый метил для	„	„	„	0	„ +110°
Сернистый ангидрид для	„	„	„	0	„ +120°
Этиловый эфир	„	„	„	0	„ +150°
Этиловый спирт	„	„	„	0	„ +200°

В остальном конструкция парозаполненных термометров одинакова с жидкозаполненными.

Так как давление в манометрической системе парозаполненных термометров определяется давлением насыщенного пара в баллоне термометра и не зависит от состояния вещества, заполняющего капилляр и манометрическую капсулу, показания парозаполненных термометров не зависят от температуры капилляра. Поэтому отпадает необходимость в компенсационных приспособлениях. Равным образом длина капилляра парозаполненных термометров может быть сделана гораздо большей, чем у жидкозаполненных. Практически длина капилляра парозаполненных термометров может достигать 50 *м*, что позволяет во многих случаях сосредоточить термометры данного аппарата или установки на общем щите.

Деления шкалы парозаполненных термометров неравномерны, так как зависимость упругости паров от температуры выражается показательной функцией.

Газозаполненные термометры. Эти термометры конструктивно тождественны с парозаполненными, но не содержат жидкости. Термометрическая система заполняется каким-либо инертным га-

зом — чаще всего азотом. Газозаполненные термометры применяются для измерений в весьма широком интервале, определяемом, с одной стороны, критическими температурами газа (азот —147°; гелий —267°), с другой стороны, термоустойчивостью материала термометра (500—550°).

Шкала газозаполненного термометра равномерна, так как зависимость давления газа от температуры линейна. Температура капилляра оказывает влияние на показания термометра, поэтому для уменьшения ошибок баллон по объему делают в несколько раз больше капилляра и, кроме того, применяют компенсационное устройство. Наполнение газом производят под некоторым начальным давлением для обеспечения достаточного воздействия на манометрическую систему при повышении температуры. Выбор наивыгоднейшего давления производится опытным путем в зависимости от конструкции и материала манометрической капсулы.

Точность измерений манометрическими термометрами находится в пределах $\pm 2\%$ от предельного значения шкалы. В СССР изготовляются термометры со шкалами:

От — 50 до + 50°	От 0 до + 150°
„ — 25 „ + 100°	„ 0 „ + 200°
„ 0 „ + 110°	„ 0 „ + 300°

указывающие и регистрирующие с дисковой диаграммой.

Манометрические термометры достаточно просты по конструкции, очень выносливы к сотрясениям и загрязнениям, почти не требуют ухода, пригодны для тяжелых условий эксплоатации. К недостаткам этих приборов следует отнести значительную тепловую инерцию, исключающую возможность их применения при быстрых изменениях температуры, сравнительно небольшую дальность передачи показаний и невозможность ремонта на месте. Ремонт может быть произведен только на заводе-изготовителе и в специальной мастерской.

ГЛАВА VII

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПИРОМЕТРЫ

31. Электродвижущие силы термопар

Открытие термоэлектрических явлений относится к 1823 г., когда Зеебек впервые установил, что если спаять концы двух различных металлических проволок и один из спаев нагреть, оставляя другой холодным, то в цепи возникает электрический ток.

В 1834 г. Пельтье открыл явление противоположное явлению Зеебека. Пельтье установил, что при пропускании электрического тока в цепи, состоящей из двух различных металлов, в месте спая возникают тепловые явления, причем характер их зависит от направления тока. Если при определенном направлении тока спай нагревается, то при обратном направлении тока спай будет охлаждаться.

Кроме того, Пельтье установил, что нагревание спая разнородных проводников создает разность потенциалов на свободных концах проводников.

Электродвижущая сила, возникающая на свободных концах проводников при нагревании их спая, называется электродвижущей силой (э. д. с.) Пельтье, а сами проводники — термопарой.

Электродвижущая сила Пельтье обозначается $U_{ab}(t)$, что обозначает э. д. с., возникающую при нагревании спая проводников a и b до температуры t, причем направление тока принимается от проводника a к проводнику b.

Если термопару из проводников a и b (рис. 147) замкнуть и оба спая поддерживать при одной и той же температуре, то результирующая э. д. с. Пельтье будет, очевидно, равна нулю, так как в обоих возникают э. д. с. равной величины, направленные в цепи навстречу друг другу:

$$U_{ab}(t) - U_{ba}(t) = 0. \qquad (144)$$

Но $U_{ab}(t) = -U_{ba}(t)$, поэтому уравнение (144) можно написать:

$$E = U_{ab}(t) + U_{ba}(t) = 0, \qquad (145)$$

где E — результирующая электродвижущая сила.

В замкнутой цепи, состоящей из трех разнородных проводников (рис. 148) при одинаковой температуре всех трех спаев, результирующая э. д. с. будет также равна нулю, т. е.:

$$E = U_{ac}(t) + U_{cb}(t) + U_{ba}(t) = 0. \quad (146)$$

Решая это уравнение относительно любого члена, получим:

$$U_{ac}(t) = -U_{cb}(t) - U_{ba}(t) = U_{bc}(t) + U_{ab}(t). \quad (147)$$

Английский физик Томпсон (лорд Кельвин) установил, что в однородном проводнике при разности температур обоих концов

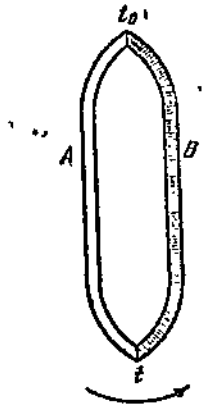


Рис. 147. Схема термопары.

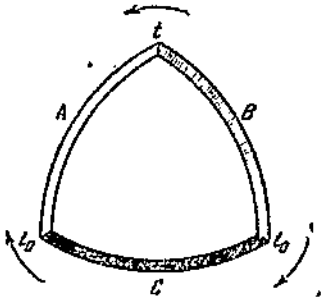


Рис. 148. Схема цепи из трех проводников.

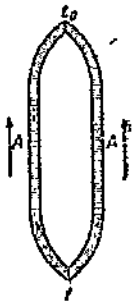


Рис. 149. Схема цепи с э. д. с. Томпсона.

проводника также возникает э. д. с., названная э. д. с. Томпсона. Электродвижущая сила Томпсона обозначается $\sigma_a(tt_0)$, т. е. э. д. с., возникающая в проводнике a (рис. 149) при температуре концов проводника t и t_0. Направление тока от возникающей э. д. с. будет от конца с температурой t к концу с температурой t_0. Легко видеть, что для данного проводника a:

$$\sigma_a(tt_0) = -\sigma_a(t_0t). \quad (148)$$

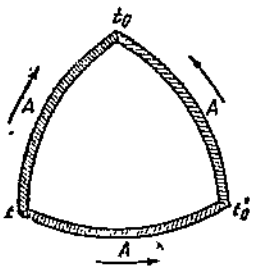


Рис. 150. Схема цепи из трех проводников с э. д. с. Томпсона.

В цепи, составленной из трех однородных проводников a (рис. 150), спаи которых имеют температуры $t_1 > t > t_0$, результирующая э. д. с. Томпсона также будет равна нулю, т. е.:

$$E = \sigma_a(t_1t_0) - \sigma_a(t_1t) - \sigma_a(tt_0) = \sigma_a(t_1t_0) + \sigma_a(tt_1) + \sigma_a(t_0t) = 0. \quad (149)$$

Отсюда можно определить любое слагаемое, например:

$$\sigma_a(tt_1) = -\sigma_a(t_1t_0) - \sigma_a(t_0t) = \sigma_a(t_0t_1) + \sigma_a(tt_0). \quad (150)$$

В замкнутой термопаре, составленной из разнородных металлов, оба спая которой имеют разную температуру t и t_0 (рис. 147),

результирующая э. д. с. будет складываться из э. д. с. Пельтье и э. д. с. Томпсона и будет равна:

$$E = U_{ab}(t) - U_{ab}(t_0) + \sigma_b(tt_0) - \sigma_a(tt_0). \quad (151)$$

Эту же результирующую э. д. с. можно написать:

$$E = U_{ab}(t) + U_{ba}(t_0) + \sigma_b(tt_0) + \sigma_a(t_0t), \quad (152)$$

т. е. результирующую э. д. с. замкнутой термопары можно получить, суммируя э. д. с. Пельтье и Томпсона, обходя цепь против часовой стрелки.

Из уравнения (152) вытекает, что э. д. с. термопары представляет сложную функцию двух переменных величин t и t_0, т. е. температур обоих спаев термопары.

При t_0=const $E=f(t)$. Это соотношение лежит в основе теории и техники пирометрии. Если для данной термопары известно изменение э. д. с. с изменением температуры t при постоянной температуре t_0, т. е. известен вид $f(t)$, то, измеряя э. д. с. термопары, можно определить температуру нагретого спая.

Влияние третьего проводника в термоэлектрической цепи. Для измерения э. д. с. термопары необходимо свободные концы термопары соединить проводниками с каким-либо измерительным прибором, например, с гальванометром (рис. 151). Можно доказать, что введение в цепь третьего проводника не изменяет величину э. д. с. термопары.

В самом деле, допустим, что в цепь термопары, состоящей из проводников a и b, введен третий проводник c (рис. 152), причем температуры точек присоединения третьего проводника к термопаре постоянны и равны между собой.

Определим результирующую э. д. с. системы по правилу уравнения (152), обходя цепь против часовой стрелки:

$$E = U_{ab}(t) + \sigma_b(tt_0) + U_{bc}(t_0) + U_{ca}(t_0) + \sigma_a(t_0t). \quad (153)$$

На основании уравнения (147) можно написать:

$$U_{bc}(t_0) + U_{ca}(t_0) = U_{ba}(t_0).$$

Заменяя в уравнении (153) сумму членов $U_{bc}(t_0) + U_{ca}(t_0)$, получим окончательно:

$$E = U_{ab}(t) + \sigma_b(tt_0) + U_{ba}(t_0) + \sigma_a(t_0t). \quad (154)$$

Из уравнения (154) следует, что э. д. с. термопары не изменяется от введения в цепь третьего проводника, если концы этого проводника находятся при одинаковой температуре.

Неравенство температур точек присоединения концов третьего проводника создает изменение результирующей э. д. с. термопары. Если температуры точек присоединения будут t_0 и t_0' (рис. 152), то результирующая э. д. с. будет

$$E_1 = U_{ab}(t) + \sigma_b(tt_0) + U_{bc}(t_0) + \sigma_c(t_0t'_0) + U_{ca}(t'_0) + \sigma_a(t'_0t). \quad (155)$$

Вычитая уравнение (155) из уравнения (154), получим:

$$E - E_1 = U_{ab}(t) + \sigma_b(tt_0) + U_{ba}(t_0 + \sigma_a(t_0t) - U_{ab}(t) - \sigma_b(tt_0) - U_{bc}(t_0) - \sigma_c(t_0t'_0) - U_{ca}(t'_0) - \sigma_a(t'_0t). \quad (156)$$

После сокращения подобных членов и преобразований, принимая во внимание, что:

$$U_{ba}(t_0) - U_{bc}(t_0) = U_{ba}(t_0) + U_{cb}(t_0) = U_{ca}(t_0);$$
$$\sigma_a(t_0t) - \sigma_a(t_0't)\ \sigma_a(t_0t'_0)$$

и

$$-U_{ca}(t'_0) = U_{ac}\ t_0'),$$

получим:

$$E_0 = E - E_1 = U_{ca}(t_0) + \sigma_a(t_0t'_0) + U_{ac}(t_0') + \sigma_b(t_0't_0), \qquad (157)$$

т. е. при нагревании спая третьего проводника до температуры t'_0, отличающейся от температуры t_0, результирующая э. д. с. термопары уменьшается на величину E_0, представляющую э. д. с. так называемой паразитной термопары $U_{ac}(t_0t_0)$, направленную против э. д. с. пары ab.

Третий проводник в одной из ветвей термопары. Включение третьего проводника в одну из ветвей термопары также не изменяет э. д. с. термопары, если температура обоих концов третьего провода одинакова (рис. 153).

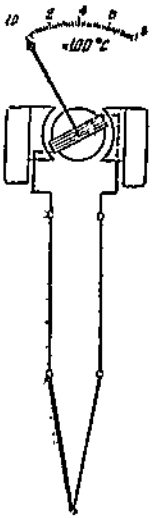


Рис. 151. Схема измерения э. д. с. термопары.

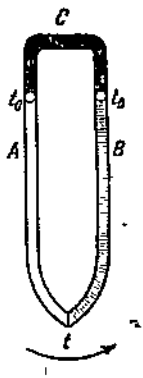


Рис 152. Схема термопары с третьим проводником.

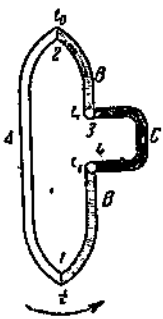


Рис. 153. Схема цепи с третьим проводником в ветви термопары.

Величина э. д. с. системы будет равна:

$$E = U_{ab}(t) + \sigma_b(tt_1) + U_{bc}(t_1) + U_{cb}(t_1) + \sigma_b(t_1t_0) + U_{ba}(t_0) + \sigma_a(t_0t), \qquad (158)$$

но

$$U_{bc}(t_1) + U_{cb}(t_1) = U_{bc}(t_1) - U_{bc}(t_1) = 0,$$

а

$$\sigma_b(tt_1) + \sigma_b(t_1t_0) = \sigma_b(tt_0),$$

поэтому:

$$E = U_{ab}(t) + \sigma_b(tt_0) + U_{ba}(t_0) + \sigma_a(t_0t). \qquad (159)$$

Уравнение (159) есть основное уравнение термопары *ab*. При неравенстве температур концов проводника *c* э. д. с. системы уменьшится на величину э. д. с. паразитной термопары *bc* при температурах концов t_1 и t'_1.

Характеристические кривые термопар. Для каждой термопары на основании экспериментальных данных можно построить характеристическую кривую.

Количество этих характеристик можно значительно уменьшить, если для каждого металла, пригодного для термопар, построить характеристику в паре с каким-либо одним металлом, принятым за нормальный. В пирометрии в качестве такого металла принята платина. Зная характеристики двух каких-либо металлов в паре с платиной, можно построить характеристику пары данных двух металлов, пользуясь следующей зависимостью.

Допустим, что имеются три термопары, *ab*, *ac* и *bc*, составленные из металлов *a*, *b* и *c*. Температуры горячих спаев этих термопар равны *t*, а холодных t_0. Э. д. с. этих термопар обозначим $E_{ab}\ (tt_0)$; $E_{ac}\ (tt_0)$ и $E_{bc}\ (tt_0)$. Тогда

$$E_{ab}(tt_0) = U_{ab}(t) + \sigma_b(tt_0) + U_{ba}(t_0) + \sigma_a(t_0t). \qquad (160)$$

$$E_{ac}(tt_0) = U_{ac}(t) + \sigma_c(tt_0) + U_{ca}(t_0) + \sigma_a(t_0t). \qquad (161)$$

Вычитая первое уравнение из второго, получим:

$$E_{ac}(tt_0) - E_{ab}(tt_0) = U_{ac}(t) + \sigma_c(tt_0) + U_{ca}(t_0) + \sigma_a(t_0t) - \\ - U_{ab}(t) - \sigma_b(tt_0) - U_{ba}(t_0) - \sigma_a(t_0t). \qquad (162)$$

Из предыдущего известно, что:

$$U_{ac}(t) - U_{ab}(t) = U_{bc}(t);$$
$$U_{ca}(t_0) - U_{ba}(t_0) = U_{cb}(t_0).$$

Подставляя эти значения в уравнение (162), получим:

$$E_{ac}(tt_0) - E_{ab}(tt_0) = U_{bc}(t) + \sigma_c(tt_0) + U_{cb}(t_0) + \sigma_b(t_0t), \qquad (163)$$

но правая часть уравнения (163) есть э. д. с. пары *bc*, следовательно, уравнение можно представить в виде:

$$E_{ac}(tt_0) - E_{ab}(tt_0) = E_{bc}(tt_0) \qquad (164)$$

или, изменив знаки:

$$E_{ac}(tt_0) + E_{ba}(tt_0) = E_{bc}(tt_0), \qquad (165)$$

т. е. зная характеристики двух металлов в паре с нормальным, можно построить характеристику пары этих металлов, причем последняя будет алгебраической суммой двух первых характеристик.

Поправка на температуру холодного спая. Выше установлено, что э. д. с. термопары выражается в функции температуры горячего спая или, что то же, температуры исследуемой среды, лишь при постоянстве температуры холодного спая ($t_0 = \text{const}$).

Обычно термопара градуируется для определенной температуры холодного спая; при измерениях температура холодного спая

может быть иной, не равной температуре градуировки. Несовпадение рабочей и градуировочной температур холодного спая внесет определенную погрешность и вызовет необходимость введения поправки. На основании приведенных выше соотношений легко вывести уравнение поправок на температуру холодного спая. В общей форме уравнение имеет вид:

$$E_{ab}(tt_0) = E_{ab}(tt_0') \pm E_{ab}(t_0t_0'), \qquad (166)$$

где t — измеряемая температура;

t_0 — температура холодного спая градуировочная;

t_0' — температура холодного спая рабочая.

Знак плюс относится к случаю, когда рабочая температура спая выше градуировочной температуры ($t_0' > t_0$), а минус к случаю $t_0' < t_0$. Величину $E_{ab}(t_0t_0')$ при небольших значениях разности $t_0'-t_0$ можно получить из характеристики термопары, принимая прямолинейную зависимость $E=f(t)$.

Особенности измерения температуры термопарами заключаются в необходимости весьма точно измерять малые значения э. д. с., не превышающие 60 *мв* в цепи, имеющей значительное сопротивление.

32. Материалы и конструкция термопар

Термоэлектродные материалы. К материалам для изготовления термопар предъявляются многочисленные и разнообразные требования, из которых основными являются: устойчивость к действию высоких температур; постоянство и воспроизводимость термоэлектрических свойств; большая величина электродвижущей силы, возникающей при нагревании спая термопары, и правильная и простая функциональная зависимость этой э. д. с. от температуры; малая величина и малый температурный коэфициент сопротивления; дешевизна.

Всем указанным требованиям не удовлетворяет полностью ни один из известных и применяемых в термоэлектрических приборах материалов; поэтому на практике приходится пользоваться различными материалами для измерений в разных пределах температур.

Необходимо отметить, что термоэлектрические свойства материалов зависят в весьма сильной степени от их состава. Поэтому, строго говоря, термоэлектрические свойства большинства термоэлектродных материалов невоспроизводимы, и при замене износившихся термоэлектродов новыми, изготовленными, номинально, из того же металла или сплава, необходимо термопару градуировать заново.

Из чрезвычайно обширного ассортимента термоэлектродных материалов в производственной практике наиболее широкое применение получили для положительного электрода медь, железо, нихром, хромель, платино-родий и для отрицательного электрода — константан, алюмель, платина, сплав 60% золота, 30% палладия и 10% платины.

Перечисленные материалы могут применяться для измерения температур в пределах, указанных в табл. 6.

Таблица 6

Пределы применения термоэлектродных материалов

Наименование материала	Предельная температура °С
Медь	500
Железо (проволока диаметром $\leqslant 3{,}0$ *мм*)	600
Железо (проволока диаметром $\geqslant 1{,}0$ *мм*)	800
Константан и копель (диаметром $\leqslant 1{,}0$ *мм*)	600
Константан и копель (диаметром $\geqslant 3{,}0$ *мм*)	800
Алюмель	1000
Нихромы и хромель	1000—1100
Сплав золота, палладия и платины	1200—1250
Платина	1400—1500
Платино-родий	1400—1500

Составы названных термоэлектродных сплавов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Составы термоэлектродных сплавов

Название сплава	Составные части в %						
	Ni	Cr	Cu	Fe	Al	Mn	Si
Нихром I	84,6	12,4	—	3,0	—	—	—
Нихром II	62,6	10,3	—	27,0	—	—	—
Константан	40,0	—	60,0	—	—	—	—
Копель	45,0	—	55,0	—	—	—	—
Алюмель	94,0	—	—	0,5	2,0	2,5	1,0
Хромель	89,0	9,8	—	1,0	—	0,2	—

Для всех применяемых в термоэлементах металлов и сплавов величина э. д. с. имеет сложную функциональную зависимость от температуры, кроме пары платина — платино-родий, кривая термоэлектродвижущей силы которой в интервале от 300 до 1200° довольно точно совпадает с параболой, выражаясь уравнением:

$$E(t\,0) = a + bt + ct^2, \qquad (167)$$

где $E\ (t\,0)$ — термоэлектродвижущая сила при температуре горячего спая $t°$ С и холодного спая 0° С;

a, b и c — постоянные.

Ввиду отсутствия простой закономерности в возрастании э. д. с. с температурой найденные значения э. д. с. для какого-либо температурного интервала нельзя интерполировать в другие интервалы температур.

Величины э. д. с., развиваемые наиболее часто применяемыми металлами и сплавами в паре с платиной, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Электродвижущие силы в *мв* в паре с платиной при t° холодного спая 0°С

Температура °С	Медь	Железо	Константан	Копель	Алюмель	Хромель	Нихром I	Нихром II	Сплав Au 60%, Pd 30%, Pt 10%	Сплав Pt 90%, Rh 10%
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0,76	1,8	—3,4	—3,6	—1,7	2,4	2,2	0,7	—2,31	0,64
200	1,52	3,4	—7,05	—8,0	—2,5	5,8	4,7	1,6	—5,18	1,42
300	3,13	4,7	—11,0	—13,1	—3,0	9,4	7,4	3,0	—8,81	2,30
400	4,64	5,6	—15,4	—18,3	—3,8	12,7	10,1	4,7	—12,4	3,23
500	6,39	6,3	—19,8	—23,5	—4,7	16,1	12,9	6,5	—15,9	4,20
600	8,26	7,0	—24,3	—29,5	—5,7	19,3	15,7	8,4	—20,2	5,21
700		8,0	—29,0	—35,4	—6,6	22,5	18,6	10,8	—24,5	6,25
800		9,5	—33,8	—41,1	—7,5	25,7	21,4	13,3	—28,7	7,31
900		11,0	—38,5	—	—8,4	28,9	24,3	15,8	—32,0	8,43
1000					—9,2	32,1	27,1	18,7	—37,0	9,56
1100					—9,8	35,5	29,9	—	—41,2	10,72
1200									—45,4	11,89
1300										13 07
1400										14,26
1500										15,45
1600										16,63
1700										17,81

Конструкция термопар. Термопара представляет собой две проволоки из разнородных металлов, нагреваемые концы которых спаяны или сварены, как это показано на рис. 154. Проволоки электродов изолированы друг от друга в термопарах для температур до 400° асбестовой обмоткой или стеклянными бусами. В термопарах для высоких температур изоляция выполняется фарфоровыми трубками. Термоэлектроды помещаются в защитный чехол, на верхнем конце которого укреплена головка с клеммами для присоединения проводов.

Устройство термопары показано на рис. 155.

Диаметр электродов промышленных термопар из неблагородных металлов обычно 1,0—3 *мм*, из благородных металлов 0,3—0.5 *мм*. Более тонкие проволоки нежелательны вследствие недостаточной прочности, малой долговечности и повышенного сопротивления.

Особую конструкцию имеют поверхностные термопары, предназначенные для измерения температур поверхности.

Лучковая поверхностная термопара (рис. 156) представляет собой тонкую ленту из двух разнородных металлов, спаянную посредине ее длины. Лента натянута на эластичную металлическую дугу, снабженную рукояткой. К концам ленты, изо-

лированной от поддерживающей дуги, прикреплены провода, идущие к гальванометру. Измерение температуры производится

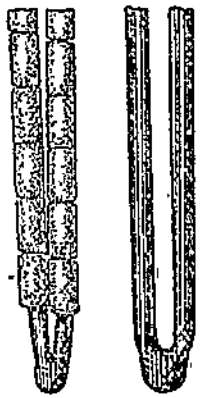


Рис. 154. Спай термопары.



Рис. 155. Устройство технической термопары.

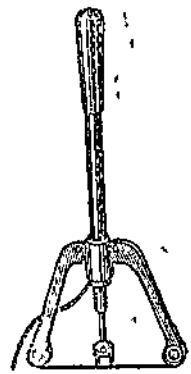


Рис. 156. Лучковая термопара.

прикладыванием ленты к поверхности трубопровода или другой детали.

Жезловая поверхностная термопара (рис. 157) состоит из жезла, на конце которого шарнирно укреплена небольшая плоская медная пластинка, прикладываемая к поверхности. К этой пластинке припаян горячий спай термопары, термоэлектроды которой проходят внутри жезла.



Рис. 157 Жезловая термопара.

Промышленные термопары. Медь — копель. Термоэлектродвижущая сила при температуре горячего спая 100° и холодного спая 0° равна приблизительно 5 *мв*. Термопара применяется во многих случаях, в особенности в лабораториях, в виде тонких проволок диаметром 0,3—0,7 *мм*, изолированных шелком или эмалированных, для измерения низких температур, так как изоляция разрушается уже при 150—200°. Для более высоких температур применяются трубчатые термопары. Изолированная асбестом копелевая проволока диаметром 2 *мм* впаивается в дно медной трубки диаметром $^{8}/_{6}$ *мм*. В этой форме термопара может применяться при температурах 500°. Градуировочная таблица термопары медь — копель дана в табл. 9.

Градуировочные данные термопары медь—копель

Температура °С	Медь—копель гр. 595[1] *мв*	Температура °С	Медь—копель гр. 595[1] *мв*	Температура °С	Медь—копель гр. 595[1] *мв*
—50	—2,10	200	10,29	450	26,56
0	0	250	13,48	500	30,16
50	2,28	300	16,68	550	33,81
100	4,75	350	19,88	600	37,47
150	7,42	400	23,08		

Железо—константан. Термоэлектродвижущая сила составляет около 5,2 *мв* на 100°, возрастая при более высоких температурах до 6—6,5 *мв* на 100°. Термопары при диаметре проволок 3—4 *мм* могут работать при температурах до 800°.

Хромель—алюмель. Термоэлектродвижущая сила составляет около 4,1 *мв* на каждые 100° — характеристика термопары почти линейна. Термопары выполняются из проволок диаметром 3—4 *мм*, изолированных асбестом или фарфоровыми бусами, и защищаются железной трубкой.

Термопары могут длительно работать при температурах до 1100°.

Платина—платино-родий (10%). Электродвижущая сила термопары изменяется по нелинейному закону от 0,64 до 1,18 *мв* на 100°. Термопары применяются большею частью в виде проволок диаметром 0,5 *мм*, концы которых сварены вольтовой дугой. Проволоки помещаются в каналах фарфоровых трубок и защищаются внешней силитовой или шамотной трубкой (рис. 158).

Платиновые элементы при 1200° становятся кристаллическими, уменьшая свою механическую прочность. Хорошо противостоят окислительной среде, но быстро разрушаются в восстановительной атмосфере и в присутствии паров металлов.

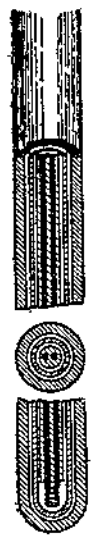


Рис. 158. Платино-платинородиевая термопара с двойной защитной трубкой.

Ввиду дороговизны материала термопары изготовляются строго необходимой длины, компенсационные же провода делаются из медных или никелевых сплавов.

Термопары могут длительно работать при температурах до 1600°.

Сопротивление 1 *м* проволоки диаметром 0,5 *мм* составляет: платиновой 0,55 *ом* и платино-родиевой 0,90 *ом*.

[1] гр. 595 означает заводской номер градуировочной кривой, соответствующий данной термопаре. Этот номер обязательно выставляется на головке термопары и на шкале отвечающего ей гальванометра.

Градуировочные данные этих термопар даны в табл. 10.

Таблица 10

Градуировочные данные различных термопар

Термопара °С	Железо—копель гр. 589 *мв*	Хромель—копель гр. 592 *мв*	Хромель—алюмель		Платинородий—19—29 гр. 421 *мв*	Платинаплатинородий гр. 308Н *мв*
			гр. 569 *мв*	гр. 531-б *мв*		
0	0	0	0	0	0	0
100	5,75	6,90	4,05	4,10	2,97	0,64
200	12,00	14,65	8,40	8,15	6,40	1,42
300	18 30	23,10	12,50	12,30	10,60	2,31
400	24,60	31,53	16,60	16,60	15,12	3,24
500	30,90	40,15	20,75	20,70	19,96	4,21
600	37,40	49,00	24,85	25,00	25,00	5,22
700	44,10	57,75	29,00	29,20	30,38	6,25
800	51,15	66,40	33,15	33,50	35,70	7,32
900			37,20	37,50	41,00	8,43
1000			41,50	41,30	46,42	9,57
1100			45,70	45,10	51,80	10,74
1200					57,10	11,95
1300					62,42	13,15
1400						14,37
1500						15,55
1600						16,70

Термопары в основном применяются как пирометры, т. е. для измерения температур выше 550°. Для измерения температур до 500° термопары целесообразно применять лишь при небольшом числе точек измерения, отсутствии других приборов, требующих для работы постоянного тока, и невозможности обеспечить установку квалифицированным обслуживанием. В остальных случаях для измерения температур до 500° следует предпочесть термометры сопротивления, являющиеся более точными и долговечными приборами.

Армировка термопар. Для защиты термопар от механических повреждений и в особенности от химического воздействия среды при высокой температуре термопару заключают в защитную оболочку, придающую ей механическую прочность и преграждающую доступ к термопаре газов или жидкостей, могущих разрушающе действовать на материал электродов термопары.

Термоэлектроды изолируют один от другого асбестовой обмоткой или фарфоровыми, магнезитовыми или кварцевыми трубками, надетыми на термоэлектроды. Для электродов диаметром свыше 1 *мм* применяются одноканальные трубки, надетые на каждый электрод в отдельности (рис. 154). Электроды диаметром менее 1 *мм* изолируют двухканальными трубками, нанизанными на оба электрода одновременно (рис. 155).

Для облегчения нанизывания трубок на электроды трубки берутся в виде отрезков длиной 5—6 *см*. Спай термопары остается

голым и изолируется от наружной трубы магнезитовой или асбестовой набойкой на дне защитной трубы.

Изолированные электроды погружаются в защитную трубу с глухим донышком, образующую чехол, закрывающий электроды со всех сторон. Защитные трубы делаются либо одинарными, либо двойными, состоящими из двух концентрических труб из разного материала (рис. 158).

Наружная защитная труба ввинчена в головку термопары, внутри которой на эбонитовом или бакелитовом основании укреплены две клеммы, соединенные с электродами термопары. Клеммы служат для присоединения концов компенсационных проводов.

Для выхода компенсационных проводов головка снабжена сбоку отверстием с коротким патрубком.

Арматура термопар должна быть газонепроницаема, теплопроводна, устойчива к резким переменам температур, механически прочна и устойчива к толчкам и ударам, жароупорна, неспособна выделять, при рабочей температуре, газов или паров, действующих на материал электродов.

Для температур выше 1200° еще не найден материал, который обладал бы всеми перечисленными свойствами; поэтому применяют двойную защитную оболочку из разных материалов, свойства которых дополняют друг друга.

Наиболее употребительны для защитных оболочек следующие материалы:

Медные, бронзовые и монелевые трубы для термопар до 500°. Для уменьшения окисления применяют наружное никелирование и хромирование.

Стальные бесшовные трубы для термопар до 700°. Алитированные стальные трубы для применения в окислительной газовой среде до 900°. Трубы из высокохромистых сталей Ж27 для применения в окислительной газовой среде и в сернистых газах до 1000—1200°. Для специальных сред, как хлор, хлористый водород и т. п., применяют стальные трубы, покрытые стекло-эмалью для термопар до 600°. Толщина стенок стальных защитных труб должна быть не меньше 2 *мм*.

Трубы из плавленого кварца для термопар до 1400—1500°. Кварцевые трубы при достаточной механической прочности и высокой жароустойчивости обладают рядом недостатков: при температуре выше 1000° проницаемы для водорода и метана, причем двуокись кремния восстанавливается до элементарного кремния, пары которого быстро разрушают платиновые электроды термопары. Пары щелочей, солей щелочных металлов, окислов тяжелых металлов, а также железная окалина быстро разрушают кварцевые трубы. При длительном нагреве выше 1050° они расстекловываются, теряя механическую прочность.

Трубы из твердого фарфора, содержащего 26% Al_2O_3, для термопар до 1300°. Трубы газонепроницаемы до 1400°. Для фарфоровых труб опасно соприкосновение при рабочих температурах с асбестом и окислами железа, образующими с фарфором легкоплавкие соединения. Недостаток фарфоровых труб заключается в малой термической стойкости; нагрев и охлаждение их во избежание появления трещин следует вести очень медленно.

Трубы из марквартовской массы (30—40% Al_2O_3) допускают рабочую температуру до 1400°. Недостатком является газопроницаемость и малая термостойкость.

Алундовые трубы (до 95% Al_2O_3) допускают длительную работу при 1500°, кратковременную до 1600°. Стойки против действия плавиковой кислоты и фтористых солей.

Щелочи действуют слабо; опаснее расплавленные окислы металлов. Недостаток — большая газопроницаемость.

Шамотные трубы в зависимости от состава допускают работу при температурах 1200—1500°. Недостатками шамота являются значительная пористость, недостаточная кислотостойкость, нестойкость к двуокиси кремния и окиси углерода.

Силитовые и карборундовые трубы допускают работу до 2000°. При температурах выше 1200° углерод медленно выгорает, выделяя окись углерода внутрь трубки; поэтому такие трубы не пригодны для платиновых термопар. При температурах выше 1000° на силит действуют окислы металлов и основные шлаки.

Графитовые трубы; рабочая температура может достигать 2000°. Медленно окисляются, выделяя окись углерода внутрь трубки. Разъедаются железом, окислами металлов, кремнеземом.

Термопары по виду арматуры делятся на прямые и коленчатые. Длина прямых термопар, считая от головки, от 500 до 2000 *мм*. Наиболее употребительные длины 1,0; 1,5 и 2,0 *м*. Термопары медно-константановые или медно-копелевые, предназначенные для измерения температуры жидкости или пара в трубопроводах, имеют длину хвоста от 150 до 500 *мм*.

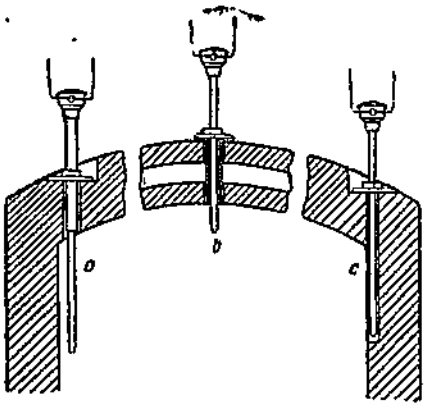


Рис. 159. Вертикальная установка термопары:

a — установка у стены печи; *b* — установка на своде; *c* — установка в нише.

Угловые термопары изготовляются с длиной хвоста 500 *мм*.

При измерении высоких температур (свыше 700°) следует учитывать уменьшение механической прочности арматуры и принимать меры к предохранению ее от изгиба от собственного веса. Поэтому наивыгоднейший монтаж термоэлектрических пирометров будет вертикальное расположение термопары (рис. 159). При горизонтальном расположении следует наблюдать за тем, чтобы свободный свешивающийся конец термопары был как можно короче.

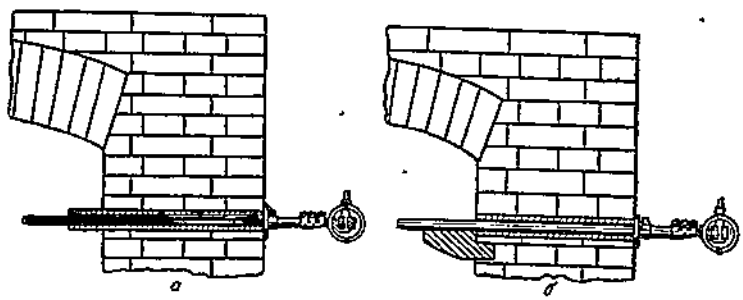


Рис. 160. Горизонтальный монтаж термопары:
а — в шамотной трубе; *б* — на шамотной консоли.

В случае необходимости ввести термопару в канал или топочное пространство на большую длину необходимо установить поддерживающую толстостенную шамотную трубу, либо поддерживающий шамотный кронштейн, как это показано на рис. 160 (*а* и *б*).

Если есть опасность повреждения термопары при обслуживании печи (загрузка шихты и т. п.), следует устанавливать термопару в нише, устроенной в боковой стенке, либо в своде печи, так, чтобы конец термопары не выходил за плоскость стенки или свода (рис. 161). Расположение термопары в углублении стены или свода, как увидим ниже, может внести существенную ошибку в показание термометра, поэтому в этих случаях необходимо экспериментально установить поправку.

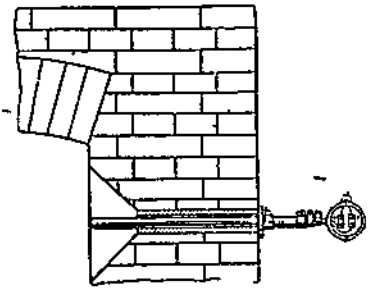


Рис. 161. Установка термопары в нише.

33. Измерители электродвижущих сил

Пирометрические измерения выполняются гальванометрами и потенциометрами (компенсационными приборами).

Гальванометры могут быть следующих видов: лабораторные, эксплоатационные указывающие и эксплоатационные регистрирующие; для автоматической регулировки температуры применяются контактные гальванометры.

Устройство и принцип работы гальванометра. Магнитоэлектрический гальванометр Депре д'Арсонваля представляет собой основной прибор для пирометрических измерений. Он отличается высокой чувствительностью, простотой конструкции и надежностью. Работа прибора основана на взаимодействии между постоянным магнитным полем и проводником, по которому протекает электрический ток.

В гальванометре Депре д'Арсонваля магнитное поле создается постоянным магнитом. Подковообразный магнит *1* (рис. 162), снабжен полюсными наконечниками с цилиндрической выточкой *2*, внутри которой укреплен цилиндрический железный сердечник *3*. В кольцевом воздушном зазоре между полюсными наконечниками и сердечником помещена легкая рамка *4*, надетая на сердечник. Ось вращения рамки совпадает с осью сердечника, так что рамка может свободно вращаться вокруг сердечника. Зазор между полюсными наконечниками и сердечником выполняется минимальным, чтобы, с одной стороны, получить максимальную величину и равномерность магнитного поля, а с другой стороны, дать возможность рамке вращаться свободно, не задевая ни за сердечник, ни за полюсные наконечники.

Благодаря цилиндрической форме сердечников и полюсных наконечников в воздушном промежутке между ними создается равномерное магнитное поле с радиальным направлением силовых линий; поэтому на всем пути поворота рамки силовые магнитные линии пронизывают рамку в ее плоскости и магнитоэлектрическая сила, действующая на рамку, остается постоянной.

Направление силы, действующей на рамку, определяется по правилу Флеммйнга (правило левой руки), согласно которому направление силы совпадает с направлением большого пальца левой руки, если указательный палец направлен по силовым линиям магнитного поля (от N к S), а средний палец по направлению тока, текущего по проводнику (от + к —).

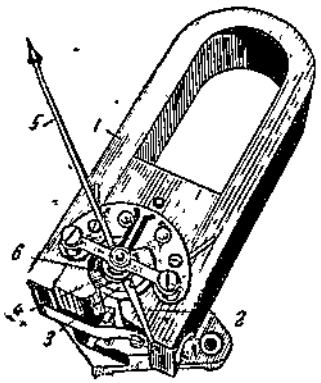


Рис. 162. Гальванометр Депре д'Арсонваля:

1—постоянный магнит; *2* — полюсные наконечники; *3*— сердечник; *4* — рамка; *5* — указательная стрелка; *6*— волоски.

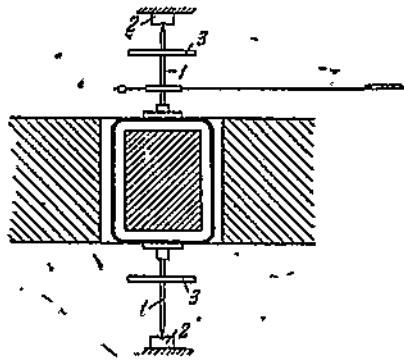


Рис. 163. Игольчатая опора рамки гальванометра:

1 — иглы; *2* — агатовые подпятники; *3* — волоски.

Опоры рамки в гальванометре Депре д'Арсонваля в более чувствительных приборах выполняются в виде тонких металлических лент, на которых подвешена рамка и которые одновременно служат для подвода тока в рамку. В менее чувствительных и более распространенных приборах рамка снабжена иглами *1*, опирающимися на подпятники из агата или рубина *2* (рис. 163). К рамке прикреплена легкая стрелка *5* (рис. 162), указывающая на дугообразной шкале положение рамки.

Магнитоэлектрический момент, стремящийся повернуть рамку при протекании в ней тока, равен

$$M_i = \frac{2Hrlni}{10 \cdot 981} \; \text{гсм}, \qquad (168)$$

где H — напряжение магнитного поля в гауссах;

r — радиус рамки в *см*;

l — активная длина рамки в *см*;

n — число витков рамки;

I — сила тока рамки в амперах.

Активная длина рамки есть длина витка, находящегося в магнитном поле; в данной конструкции активная длина рамки равна длине сердечника.

Так как для данного гальванометра величины r, l, n постоянны, то выражение магнитоэлектрического момента можно записать в виде:

$$M_1 = CHi, \tag{169}$$

где

$$C = \frac{2rln}{9810} = \text{const.}$$

Чтобы положение рамки однозначно соответствовало значению силы тока, необходимо магнито-электрическому моменту противопоставить какой-то другой момент, величина которого возрастала бы с увеличением угла поворота рамки. Таким моментом в гальванометрах с подвесной рамкой является момент скручивания ленточек подвеса.

В приборах с опорой рамки на подпятники противодействующий момент создается двумя плоскими спиральными пружинками (волосками) *3* (рис. 163), *6* (рис. 162), укрепленными одним концом к оси рамки, а другим концом к неподвижной детали (перемычке), на которой помещены подпятники рамки. В обоих случаях величина противодействующего упругого момента пропорциональна углу поворота подвижной системы.

Коэфициент пропорциональности содержит в себе модуль упругости материала (при растяжении в случае спиральной пружинки и скольжения — в случае подвесной ленты) и геометрические размеры упругой детали.

Для спиральной пружинки (волоска) момент закручивания равен:

$$M_\varphi = \frac{Ebh^3}{12l}\varphi \ \text{г см}. \tag{170}$$

Для подвесной ленты:

$$M_\varphi = 0{,}275\,\frac{Ph^3b^3}{(h^2+b^2)l}\varphi \ \text{г см}, \tag{171}$$

где E — модуль упругости при растяжении в $г/см^2$;

P — модуль упругости при скольжении в $г/см^2$;

b — ширина ленты в $см$;

h — толщина ленты в $см$;

l — длина ленты в $см$;

φ — угол закручивания.

Геометрические размеры пружинок для каждого данного гальванометра постоянны, следовательно, множители $\frac{bh^3}{12\,l}$ и $\frac{h^3b^3}{(h^2+b^2)\,l}$

будут постоянными величинами, и в обоих случаях можно написать:

$$M_\varphi = C_1 E\varphi \text{ или } = C_1 P\varphi, \qquad (172)$$

где C_1 — постоянный множитель, зависящий от геометрических размеров упругой системы.

Если по рамке гальванометра будет течь ток постоянной силы, создавшийся магнитоэлектрический момент начнет поворачивать рамку, но по мере увеличения угла поворота будет расти упругий противодействующий момент пружины или ленты.

Равновесие будет достигнуто, когда оба момента станут равными друг другу, т. е. когда:

$$M_i = M_\varphi.$$

Подставив в это равенство значения моментов, получим:

$$CHi = C_1 E\varphi$$

или

$$\varphi = \frac{C}{C_1}\frac{H}{E} i = k\frac{H}{E}\, i. \qquad (173)$$

Величины H и E не могут быть приняты постоянными, так как обе они заметно изменяются с температурой.

Температурный коэфициент напряжения магнитного поля зависит от материала, термической обработки и формы магнита. Величина температурного коэфициента колеблется в пределах 0,012—0,035%. В среднем температурный коэфициент напряжения магнитного поля может быть принят 0,03% на 1°.

Модуль упругости материала E также зависит от температуры.

Температурный коэфициент модуля упругости для фосфористой бронзы равен 0,04%, латуни 0,04%, меди 0,03% и нейзильбера 0,03%.

Учитывая влияние температуры на величины H и E, уравнение равновесия необходимо записать в виде:

$$\varphi = k\frac{H_0(1+\alpha_м\,\Delta t)}{E_0(1+\alpha_е\,\Delta t)}\, i, \qquad (174)$$

где H_0 и E_0 — напряжение магнитного поля и модуль упругости материала пружинок при температуре градуировки;

$\alpha_м$ и $\alpha_е$ — соответственные температурные коэфициенты;

Δt — повышение температуры прибора в градусах против температуры градуировки.

Так как оба температурных коэфициента имеют один и тот же знак и одинаковый порядок величин, то для измерений средней точности можно принять множитель $\frac{1+\alpha_м\,\Delta t}{1+\alpha_е\,\Delta t}$ равным единице, тогда зависимость угла поворота рамки в гальванометре

Депре д'Арсонваля от силы тока может быть выражена приближенной формулой:

$$\varphi = k_1 i. \qquad (175)$$

Все предыдущие рассуждения основывались на предположении, что на рамку гальванометра действуют только магнитоэлектрический и упругий моменты. Это предположение справедливо, однако, только для приборов с подвешенной рамкой. В приборах же с рамкой на осях, более распространенных на практике, на подвижную систему действуют еще два момента, играющие заметную роль. Эти моменты создаются силами трения в опорных подпятниках и силой тяжести, так как практически центр тяжести подвижной системы никогда не совпадает с осью вращения. При строго вертикальной оси гальванометра момент силы тяжести превращается в нуль, но в приборах с горизонтальной осью момент силы тяжести приобретает существенное значение.

Появление момента силы тяжести определяется самой конструкцией прибора: рамка с одной стороны имеет лишний виток проволоки; длинная стрелка также перемещает центр тяжести и требует специального противовеса. Конструктивно противовес стрелки выполняется в форме двух расходящихся под углом стерженьков (усиков), снабженных винтовой нарезкой, по которой перемещаются гаечки, играющие роль уравновешивающих грузиков. Когда перемещением гаечек равновесие достигнуто, гаечки закрепляются на месте обжиманием или каплей клея.

Неотбалансированный прибор вместо прямолинейной обладает сложной и неудобной формой зависимости угла отклонения от силы тока; это делает прибор не пригодным для сколько-нибудь точных определений.

Тщательно отбалансированный прибор может потерять балансировку при транспортировке и от неосторожного или неумелого обращения. Нарушенную балансировку почти невозможно восстановить, и прибор с горизонтальной осью, потерявший балансировку, необходимо после новой балансировки градуировать заново.

Как бы тщательно ни была проведена балансировка, сила тяжести все же оказывает влияние на показания прибора и тем сильнее, чем больше величина $\frac{G}{C}$, где G — вес подвижной системы прибора, а $C = \frac{2r\,nl}{9810}$. Величина $\frac{C}{G}$ называется фактором доброкачественности прибора, поэтому можно сказать, что влияние силы тяжести на прибор тем больше, чем меньше фактор доброкачественности.

Таким образом, гальванометры с горизонтальной осью вращения подвижной системы мало пригодны для точных пирометрических измерений и для этой цели предпочтительнее пользоваться так называемым профильным типом прибора с вертикальной осью. Преимуществом профильных приборов является бо́льшая точность, кроме того, они обладают более удобной для наблюдения прямолинейной шкалой.

Гальванометр является прибором, измеряющим э. д. с., но угол отклонения стрелки зависит от величины протекающего по рамке прибора тока, поэтому отсчет по шкале при одной и той же величине э. д. с. будет зависеть от сопротивления цепи гальванометра.

Сопротивление цепи гальванометра складывается из сопротивления самого прибора и сопротивления внешней цепи. Сопротивление гальванометра является постоянным для данного прибора, внешняя же цепь в зависимости от длины присоединительных проводов может иметь различную величину сопротивления. В зависимости от этого показания гальванометра не дадут истинной величины э. д. с.

Если обозначить $R_г$ — сопротивление гальванометра, $R_л$ — сопротивление внешней цепи, $e_{ист}$ — истинное значение э. д. с. и $e_г$ — показание гальванометра, то:

$$e_{ист} = e_г \frac{R_г + R_л}{R_г}. \qquad (176)$$

Из формулы (176) очевидно, что ошибка будет тем меньше, чем больше внутреннее сопротивление гальванометра. Поэтому внутреннее сопротивление гальванометра стремятся увеличить, увеличивая сопротивление катушки из манганина, компенсирующей температурные ошибки. Однако увеличение внутреннего сопротивления гальванометра уменьшает силу тока в рамке и требует более тщательного изготовления прибора для уменьшения трения в опорах.

В промышленных типах гальванометра для устранения поправок на сопротивление внешней цепи градуировка милливольтной шкалы производится при определенном добавочном сопротивлении, выполненном в виде катушки из манганиновой проволоки. Эта катушка называется уравнительной.

При монтаже гальванометра с уравнительной катушки отматывают некоторое количество витков с таким расчетом, чтобы суммарное сопротивление уравнительной катушки и внешней цепи равнялось бы первоначальному сопротивлению уравнительной катушки, т. е.

$$R_к^р + R_л = R_к^г, \qquad (177)$$

где $R_к^г$ — сопротивление уравнительной катушки при градуировке;
$R_к^р$ — сопротивление уравнительной катушки после отмотки части витков;
$R_л$ — сопротивление присоединительных проводников.

Работа гальванометра с термопарой. Для измерения температуры в производственных условиях применяются гальванометры со шкалой, разделенной на градусы температуры, или с двойной шкалой, имеющей деления в градусах и милливольтах.

Температурные шкалы наносятся на гальванометр для термопары определенной характеристики и для определенной величины сопротивления внешней цепи. Поэтому температурной шкалой гальванометра можно пользоваться без поправок лишь в том случае, когда к гальванометру присоединена термопара

той же характеристики при той же величине сопротивления присоединительных проводов.

В случае присоединения к гальванометру термопары другой характеристики и при другом значении сопротивления внешней цепи, при наличии двойной шкалы необходимо составить поправочную таблицу для температурной шкалы. Для составления поправочной таблицы необходимо иметь характеристику присоединенной термопары.

Подсчет поправок производится следующим способом. Пусть двойная шкала гальванометра имеет вид, изображенный на рис. 164. Характеристика присоединенной термопары соответствует кривой, приведенной на рис 165.

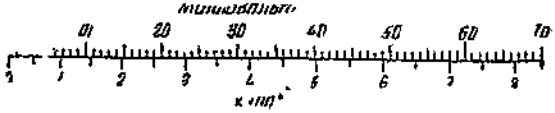


Рис. 164. Двойная шкала гальванометра.

Дано: сопротивление гальванометра $R_г = 100$ ом;
сопротивление линии $R_л = 5$ ом;
температура холодного спая $t = 40°$;
при отключенной термопаре стрелка гальванометра стоит на нуле.

Находим поправки для круглых значений температур: 100, 200, 300, 400, 500, 600° и т. д.

На шкале гальванометра 200° соответствует величина э. д. с. 14,65 *мв*.

Пересчитывая э. д. с. на истинное значение, найдем:

$$e_{ист} = 14{,}65 \frac{100 + 5}{100} = 15{,}38 \text{ мв}.$$

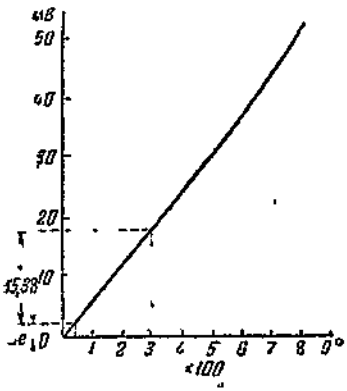


Рис. 165.
Характеристика термопары.

На кривой характеристики термопары находим величину э. д. с. Δl, соответствующую температуре холодного спая $t°$. К найденной величине прибавляем значение истинной э. д. с. для температуры 200° и по кривой получаем значение температуры, равное 298°, соответствующей полученным э. д. с. для нашей термопары. Разность между полученной величиной и значением температуры по шкале 298—200=98° и будет составлять величину поправки. Подобным же образом находим поправки и для других точек шкалы гальванометра.

Если при смене термопары внешнее сопротивление не изменилось или оно было подогнано под то же значение, то пересчет э. д. с. производить не нужно, так как в этом случае отсчет по шкале гальванометра дает истинное значение э. д. с.

В случае гальванометра с одной температурной шкалой введение поправок невозможно без предварительного перевода градусных делений шкалы в милливольтные деления.

Регистрирующие гальванометры. Чрезвычайно малый вращающий момент рамки гальванометра исключает возможность непосредственной записи показаний пером, укрепленным на стрелке прибора. Поэтому для записи показаний гальванометра необходимо прибегать к косвенным методам, из которых наиболее широкое распространение получила система падающей дужки, применяемая в настоящее время в лучших моделях регистрирующих гальванометров.

Сущность системы записи состоит в периодическом прижимании стрелки к диаграммной бумаге, причем стрелка оставляет на

бумаге точечную отметку. В промежутках между моментами прижатия стрелка гальванометра совершенно свободна и может перемещаться беспрепятственно.

Устройство регистрирующего гальванометра завода «Пирометр» схематически изображено на рис. 166. Электрическая измерительная часть гальванометра состоит из бескаркасной рамки *1*, подвешенной на ленточных растяжках *2*. К рамке закреплена

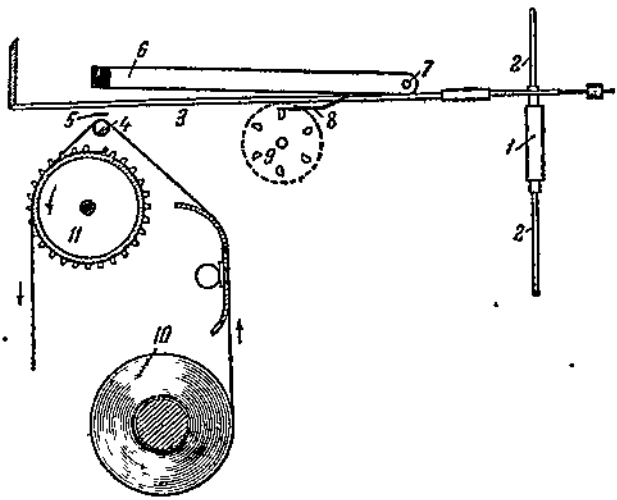


Рис. 166. Регистрирующий гальванометр. Схема записывающего устройства:
1 — рамка гальванометра; *2* — ленточные подвесы; *3* — стрелка; *4* — несущий валик; *5* — красящая лента; *6* — падающая дужка; *7* — ось падающей дужки; *8* — опорная пружина дужки; *9* — кулачковый диск; *10* — бумажный рулон; *11* — приводный валик.

стрелка *3* ножевидного типа, двигающаяся по профильной шкале. Под стрелкой расположен валик *4*, несущий диаграммную бумажную ленту, над бумагой параллельно образующей валика натянута красящая лента *5*. Над стрелкой расположена легкая алюминиевая рамка *6* (дужка), вращающаяся вокруг оси *7*. Дужка пружиной *8* опирается на пальцы диска *9*, периодически поворачивающегося на некоторый угол. При повороте диска *9* пружинная опора рамки соскальзывает с поддерживающего ее пальца и рамка опускается, нажимая на стрелку и заставляя последнюю прижаться к бумажной ленте. При дальнейшем повороте диска *9* следующий палец подхватывает рамку, приподнимая ее в исходное положение и освобождая стрелку. Нажим стрелки на бумагу через красящую ленту оставляет на бумаге цветную точку. Так как падение дужки происходит периодически через равные промежутки времени, на движущейся поступательно бумажной ленте образуется пунктирная кривая изменения температуры во времени.

Регистрирующие гальванометры строятся для одновременной записи показаний нескольких термопар. Завод «Пирометр» выпускает гальванометры для записи трех и шести кривых. Для этого гальванометры снабжаются автоматическими переключателями термопар и приспособлением для смены красочных лент, так что каждая из трех или шести кривых записывается различными цветами, что позволяет легко отличить и проследить каждую кривую.

Механизмы падающей дужки, передвижения диаграммной ленты, переключения термопар и перемены цветов связаны одной кинематической системой, получающей движение от синхронного моторчика Уоррена.

Мотор Уоррена широко используется в современных регистрирующих и регулирующих приборах, заменяя часовой механизм.

Мотор Уоррена является индукционным синхронным мотором и имеет чрезвычайно простое устройство, схематически показанное на рис. 167. Мотор состоит из разомкнутого рамочного магнитопровода *1*, набранного из тонких полосок трансформаторного железа, на который надета возбуждающая катушка *2*, питаемая переменным однофазным током.

Разомкнутые концы *3* и *4* магнитопровода расточены по цилиндру и каждый из них продольным прорезом разделен на две ветви (*3*, *3'*; *4*, *4'*). На диагонально расположенные ветви *3'* и *4'* насажены медные кольца *5* и *6* являющиеся коротко замкнутой обмоткой.

В цилиндрической выточке магнитопровода расположена ось *7* ротора мотора, состоящего из двух или трех параллельно расположенных железных плоских колечек *8* и одного или двух стальных магнитиков *9*, помещенных в промежутках между кольцами.

Переменный ток, протекающий по обмотке катушки *2*, возбуждает в магнитопроводе переменный магнитный поток синфазный с током.

В ветвях концов магнитопровода, снабженных коротко замкнутыми витками, магнитный поток будет смещен по фазе на некоторый угол от основного потока вследствие того, что переменный магнитный поток будет возбуждать в коротко замкнутых ветвях переменный ток. Магнитное поле последнего, накладываясь на магнитный поток магнитопровода, создает сдвиг фаз магнитного потока в ветвях магнитопровода, снабженных коротко замкнутыми витками.

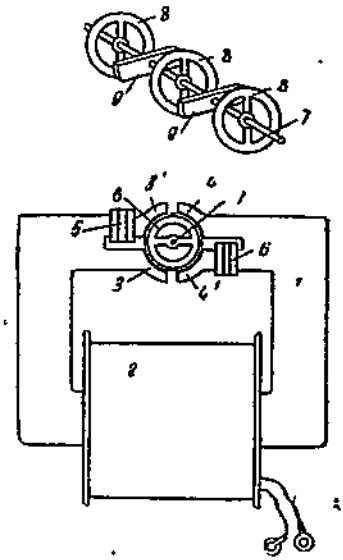


Рис. 167. Мотор Уоррена: *1* — рамочный магнитопровод; *2* — возбуждающая обмотка; *3* и *4* — полюса магнитопровода; *3'* и *4'* — ветви полюсов с коротко-замкнутой обмоткой; *5* и *6* — короткозамкнутые витки; *7* — ось ротора; *8* — кольца ротора; *9* — магниты ротора.

В результате на концах магнитопровода возникнет вращающееся магнитное поле с числом оборотов, равным числу периодов питающего мотор переменного тока. Вращающееся магнитное поле, индуцируя в железных кольцах ротора токи Фуко, будет увлекать ротор во вращение с увеличивающимся числом оборотов. При достижении ротором синхронизма дальнейшее его вращение будет поддерживаться притяжением полюсов магнитов ротора к полюсам вращающегося магнитного поля, т. е. будет строго ему синхронно.

Ось ротора мотора Уоррена будет сохранять число оборотов в точном соответствии с числом периодов переменного тока, т. е. при 50-периодном токе

будет делать 3000 об/мин. Так как в промышленных сетях переменного тока число периодов поддерживается с большой точностью (допустимые колебания от 49,5 до 50,5 периодов), мотор Уоррена может служить измерителем времени, т. е. заменять часовой механизм.

Ось ротора мотора соединена с шестеренным редуктором, понижающим число оборотов до нужной величины. Обычно внешняя ось мотора Уоррена делает от одного оборота в секунду до одного оборота в минуту.

Передача мотора Уоррена в регистрирующем гальванометре рассчитана на три оборота в минуту, что дает цикл работы механизма в 20 сек.

Кинематическая схема механизма регистрирующего гальванометра изображена на рис. 168. От мотора Уоррена *12* через зубчатую передачу *11* вращается ось с кривошипом *10*. Кривошип шарнирно связан с шатуном *13*, приводящим в колебательное движение двойное коромысло *14*. От коромысла *14* тягой *15* колебательное движение передается коромыслу *16* и тягой *17* одноплечему рычагу *18*. Рычаг *18* несет на себе собачку *19*, сцепляющуюся с храповым колесом *20*, жестко насаженным на ось кулачного диска *9*.

Каждый полный оборот кривошипа *10* или, что то же, каждое полное колебание рычага *18* поворачивает храповое колесо *20* и диск *9* на 60°, вызывая падение и поднятие дужки *6*.

Коромысло *16*, свободно вращающееся вокруг оси *21*, также снабжено собачкой *22*, сцепляющейся с храповым колесом *23*, жестко закрепленным на оси *21*. Каждое качание коромысла *16* вызывает поворот храпового колеса *23* и оси *21* на 30°; на оси *21* насажены параллельно на некотором расстоянии друг от друга три крестообразных кулака *24*, управляющих переключателями термопар.

Механизм переключателей (рис. 169) состоит из трех парных ртутных выключателей *1*, укрепленных на трех коленчатых рычагах *2*, вращающихся вокруг оси *3*. Рычаги *2* пружинами *4* оттянуты назад до соприкосновения отростка *5* рычагов *2* с упором *6*.

Параллельно оси *3* расположена ось *21* кулаков *24*. При повороте оси *21* кулаки *24* последовательно нажимают на колено рычагов *2*, отклоняя их вперед и замыкая ртутные переключатели *1*.

Система отрегулирована таким образом, что включение следующей пары включателей происходит ранее выключения предыдущей пары. Этим устраняется перерыв тока в гальванометре и резкие броски стрелки к нулю шкалы.

После включения очередной пары выключателей кулак предыдущей пары соскальзывает с рычага и пружина *4* возвращает рычаг *2* в исходное положение, разрывая цепь соответствующей термопары. На оси *21* рядом с храповым колесом *23* закреплен кулачный диск *25*, управляющий сменой красочных лент. На кулачную поверхность диска *25* опирается ролик *26* (рис. 170), закрепленный на конце отростка *27* сектора *28*. Сектор *28* и второй, параллельный ему, расположены у концов валика *4* и соединены валиком *29*, представляющим общую ось вращения обоих секторов.

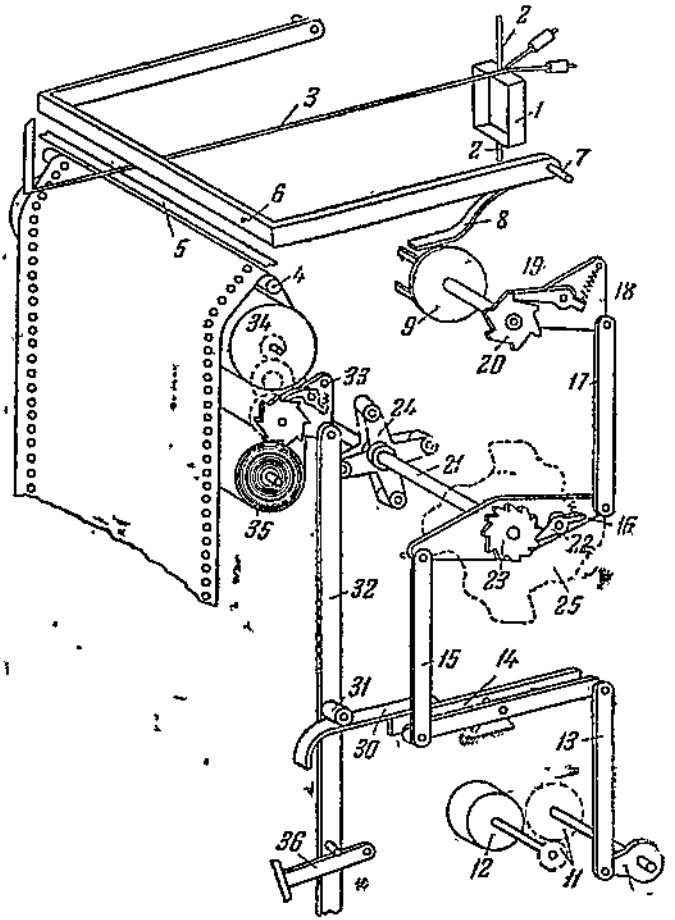


Рис. 168. Механизм многокрасочного регистрирующего гальванометра:

6 — падающая дужка; *7* — ось падающей дужки; *8*—поддерживающая пружина; *9* — кулачковый диск; *10* — кривошип; *11* — шестеренная передача; *12* — мотор Уоррена; *13* — шатун; *14* — двойное коромысло; *15* — тяга; *16* — коромысло; *17* — тяга; *18* — рычаг; *19* — собачка; *20* — храповое колесо; *21* — ось коромысла *16; 22* — собачка; *23* — храповое колесо; *24* — крестообразные кулаки переключателей; *25* — профильный диск смены красящей ленты; *30* — поводок; *31* — ролик; *32* — тяга; *33* — храповой механизм передвижения бумаги; *34* — приводной валик; *35* — бумажный рулон; *36* — рычаг перемены скорости диаграммы.

Дуги секторов имеют три выступа (*b*, *c*, *d*), служащие для закрепления концов трех красящих ленточек различных цветов (зеленая, красная и фиолетовая).[1]

В зависимости от положения кулачного диска *25* сектор будет повернут на тот или иной угол и под стрелкой будет находиться одна из трех лент. Так как диск *25* и кулаки *24* жестко связаны с осью *21*, то определенному положению выключателей будет соответствовать определенное положение секторов с лентами и таким образом каждой термопаре будет присвоен один из трех цветов записи.

Передвижение бумажной диаграммной ленты выполняется тем же механизмом (рис. 168). На второй ветви коромысла *14* укреплен поводок *30*, перемещающий при колебании коромысла через ролик *31* тягу *32* вверх и вниз. Верхний и нижний конец тяги *32* соединен шарнирно с рычагами храповых ме-

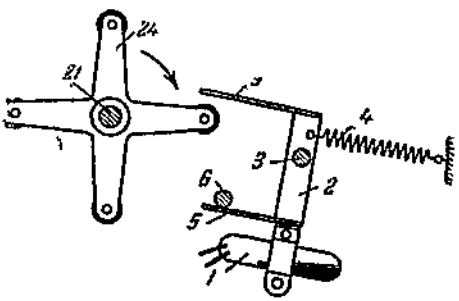


Рис. 169. Регистрирующий гальванометр. Механизм переключателей:

1 — ртутные выключатели; *2* — коленчатые рычаги; *3* — ось рычагов; *4* — натяжные пружины; *5* — отростки рычагов; *6* — опорная планка; *21* — ось кулаков; *24* — кулаки

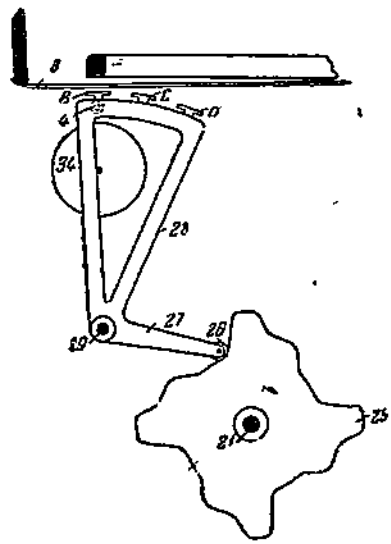


Рис. 170. Механизм смены цвета записи регистрирующего гальванометра:

3 — стрелка гальванометра; *4* — несущий валик; *21* — ось кулачного диска; *25* — кулачный диск смены цветов; *26* — ролик сектора лент; *27* — отросток сектора; *28* — сектор лент; *29* — ось вращения сектора; *34* — сматывающий валик бумажной ленты; *B*, *C* и *D* — крючки для закрепления красящих лент.

ханизмов. Верхний храповой механизм *33* через шестеренную передачу поворачивает вал *34*, снабженный на обоих концах рядами выступов, входящих в перфорацию бумажной ленты.

Таким образом, при каждом ходе тяги *32* вал *34* поворачивается на небольшой угол, увлекая за собой бумажную ленту, сматывающуюся с рулона *35*.

Нижний храповой механизм тяги *32* таким же образом вращает валик, на который наматывается использованная бумажная лента.

Механизм позволяет изменять скорость движения ленты посредством рычажка *36*, отодвигающего ролик *31* от поводка *30*. Чем дальше отодвинут ролик от поводка, тем меньше длина хода

тяги *32*, тем меньше перемещение бумажной ленты за один ход тяги.

Завод «Пирометр» выпускает регистрирующие гальванометры следующих типов:

самопишущий гальванометр СГ-1 для записи одной кривой;
самопишущий гальванометр СГ-3 на три температурные кривые;
самопишущий гальванометр СГ-6 на шесть кривых.

Кривые температур записываются на диаграммной ленте шириной 120 *мм*, могущей двигаться с тремя скоростями: 20, 40 и 60 *мм* в час.

Цена делений диаграммы при этих скоростях будет соответственно 30, 15 и 10 мин. Видимая часть диаграммы равна 340 *мм*, что дает возможность обозревать работу при скорости ленты 20 *мм/час* за 17 час., а при скорости 60 *мм/час* за 5,6 часа.

Изготовляемые заводом «Пирометр» регистрирующие гальванометры по характеру выполнения делятся на следующие виды:

Нормального исполнения, имеющие температурный коэфициент не выше $2 \cdot 0{,}003$ на 1° и величину внутреннего сопротивления: для платиновых и медно-константановых термопар 400 Ω, для железо-константановых и хромель-алюмелевых термопар 800 Ω, для термопар платино-родий — сплав 19—29 — 1000 Ω.

Улучшенного исполнения с температурным коэфициентом не выше $4 \cdot 10^{-4}$ на 1° и величинами внутреннего сопротивления не ниже нормальных приборов.

Шкалы регистрирующих гальванометров изготовляются следующих типов:

От 0 до 500° — для термопар медь — константан, медь — копель.
» 0 » 800° — для термопар железо — константан, железо — копель, хромель — копель.
» 0 » 1000° — для термопар хромель—алюмель.
» 0 » 1300° — для термопар ТБ.
» 0 » 1600° — для термопар платина — платино-родий.

Контактный гальванометр завода «Пирометр». Контактный гальванометр служит для сигнализации нарушений установленного температурного режима аппарата, а также командным прибором в системах автоматического регулирования температуры. Прибор состоит из гальванометра Депре д'Арсонваля с подвесной рамкой и контактного устройства, управляемого стрелкой гальванометра при помощи падающей дужки. На рис. 171 изображена кинематическая схема контактного гальванометра.

Стрелка гальванометра несет на себе деталь *9*, называемую «каблучком». На каблучек периодически нажимает падающая дужка *7*, движение которой осуществляется от кулачной шайбы *8*, вращаемой моторчиком Уоррена, через ролик *12* и шатун *13*. Ниже стрелки находятся два рычага *4* и *5*, поворачивающиеся вокруг системы гальванометра, причем указатели рычагов двигаются вдоль шкалы гальванометра. На рычагах *4* и *5* закреплены гибкие пластинки *14* и *15*, заканчивающиеся опорными площадками *10* и *11*. К этим пластинкам прикреплены ртутные выключатели (меркоиды, свинки) *2* и *3*. Выше падающей дужки над правой и левой ее ветвями находятся рычаги, связанные с ртутными контактами *1* (нормальный) и *B* (блокировочный).

Контактная система действует следующим образом. Рычаги *4* и *5* устанавливаются по шкале гальванометра на минимальную и максимальную температуры, допустимые по условиям процесса.

При нажиме падающей дужки на стрелку гальванометра стрелка изгибается и каблучек опускается вниз. В зависимости от положения стрелки гальванометра на шкале, т. е. от значения температуры в данный момент, каблучек при движении вниз может встретить опорную площадку *10* (если температура достигла до-

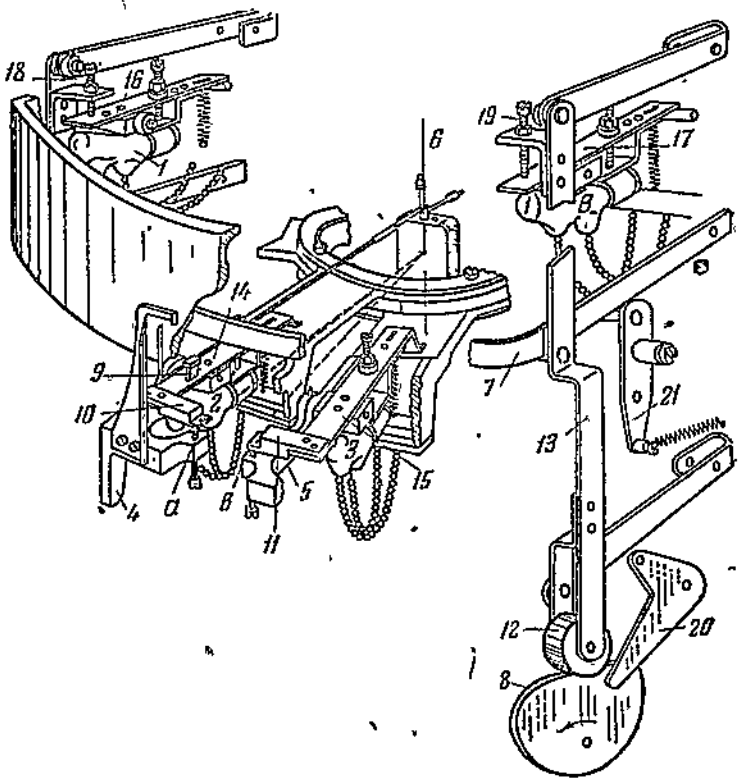


Рис. 171. Контактный гальванометр:

1 — контакт нормальный; *2* и *3* — контакты минимальный и максимальный; *4* и *5* — контрольные рычаги; *6* — рамка гальванометра; *7* — падающая дужка; *8* — кулачный диск; *9* — каблучек; *10* и *11* — опорные площадки контактов; *12* — ролик; *13* — шатун; *14* и *15* — подвижные пластинки; *16* — рычаг; *17* — рычаг; *18* — винт; *19* — винт; *B* — блокировочный контакт; *20* — ручной арретир; *21* — автоматический арретир.

пустимого минимума), либо площадки *11* (при повышении температуры до максимума), либо каблучек пройдет между опорными площадками (температура нормальна).

На рис. 171 изображено положение стрелки гальванометра при минимальной температуре, когда каблучек стрелки находится над площадкой *10*. Нажим падающей дужки заставит каблучек упереться в площадку *10* и повернуть свинку *2*, замкнув тем самым цепь сигнала «минимум» или цепь регулирующего устройства.

При подъеме температуры до максимума будет замкнут тем же порядком контакт свинки *3*. Наконец, при нормальной температуре каблучек попадет в свободный промежуток между обеими площадками; при этом падающая дужка опустится ниже, чем в предыдущих случаях, и винтом *18* нажмет рычаг *16*, замкнув нормальный контакт *1*.

При каждом опускании падающей дужки, независимо от положения стрелки гальванометра, винт *19*, связанный с шатуном *13*, нажимая рычаг *17*, замыкает блокировочный контакт *B*. Этот контакт отрегулирован так, что он замыкается всегда позже любого другого контакта и размыкается раньше всех контактов.

Этот тип гальванометра называется трехконтактным, так как сигнализирует о трех состояниях: «минимум», «нормально», «максимум». Другой разновидностью прибора является пятиконтактная система, дающая положения: «минимум», «понижено», «нормально», «повышено», «максимум».

Достигается это добавлением к опорным площадкам *10* и *11* дополнительных площадок *a* и *b*, расположенных ниже. При нажиме каблучка стрелки на одну из этих площадок замыкаются одновременно контакты *1* и *2* или *1* и *3*, что дает сигнальные комбинации «понижено» и «повышено».

Цикл поднятия и опускания падающей дужки продолжается нормально 30 сек., но сменой шестерен может быть укорочен до 15 сек. [1].

Ртутные контакты прибора могут надежно замыкать токи до 500 *ва* при силе тока до 5 *а*.

Как ясно из описания действия прибора, замыкание контактов прерывисто и продолжается лишь в течение времени нажатия дужки. Это очень неудобно как с точки зрения сигнализации, так и регулирования. Для устранения этого недостатка и превращения периодических импульсов в длительные в систему гальванометра включается дополнительное устройство, так называемое стоп-реле.

Стоп-реле, схема которого изображена на рис. 172, состоит из трех пар электромагнитов *A*, *B*, *C* и *a*, *b*, *c*, с якорями из мягкого железа, к которым прикреплены ртутные выключатели *I*, *II* и *III*. Электромагниты *a*, *b*, *c* включены параллельно в цепь блокировочного реле *B* контактного гальванометра, а электромагниты *A*, *B*, *C* соединены каждый соответственно с контактами гальванометра *1*, *3*, *2*. Меркоиды *I*, *II* и *III* включены в цепи сигналов или регулятора.

Допустим, что гальванометр замкнул контакт *I*, вследствие чего замкнулась цепь электромагнита *A*; якорь с ртутным выключателем *I* будет притянут к электромагниту *A* и выключатель замкнет цепь сигнала «нормально». Спустя несколько мгновений гальванометр замкнет блокировочный контакт *4*, вследствие

[1] Эта длительность цикла ограничивает область применения контактного гальванометра, делая его пригодным лишь для контроля систем с большой тепловой инерцией, где колебания температуры протекают весьма медленно.

чего будут возбуждены электромагниты *a*, *b* и *c*, но якоря *I*, *II* и *III* останутся в своем положении, так как якорь *I* будет удерживаться электромагнитом *A*, а якоря *II* и *III* и ранее были притянуты к электромагнитам *b* и *c*. При подъеме дужки разомкнется сперва контакт *4*, затем *1*, но якорь *I* останется в своем положении, продолжая замыкать сигнальную цепь. Если температура не изменилась, то новое опускание дужки и замыкание контактов *1* и *B* ничего не изменит в положении якорей стоп-реле. Если же температура повысилась и дошла до максимума, то нажим дужки замкнет сперва контакт *3*, а вслед за ним контакт *4*. Замыкание контакта *3* заставит сработать электромагнит *B*, притянув якорь *II* и замкнув сигнальную цепь «максимум», последующее же замыкание контакта *4* вызовет поворот якоря *I* и размыкание прежде замкнутой цепи «нормально».

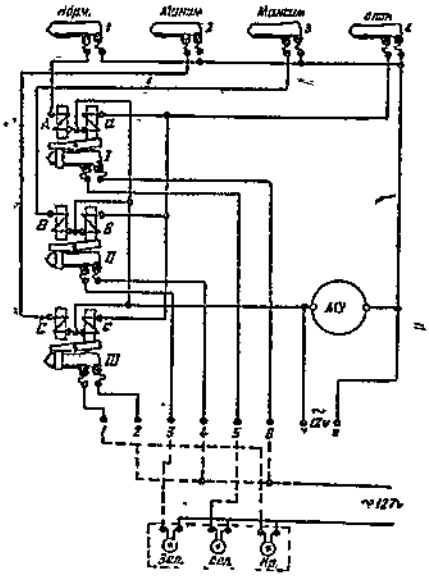


Рис. 172. Стоп-реле:
1, *2*, *3* и *4* — контакты гальванометра; *I*, *II*, *III* — меркоиды стоп-реле; *A*, *B*, *C* — сигнальные электромагниты; *a*, *b*, *c* — блокировочные электромагниты.

Таким образом, стоп-реле, замыкая одну из сигнальных цепей, держит ее замкнутой до тех пор, пока температура остается неизменной, несмотря на происходящие в это время замыкания контакта гальванометра.

Прибор имеет два арретира падающей дужки. Один из них, *20* (рис. 171), устанавливается от руки при открытой дверке прибора; второй, *21*, действует автоматически при открывании дверки прибора.

Измерение потенциометром (компенсационный метод). Компенсационный метод измерения основан на сравнении измеряемой э. д. с. с некоторой известной э. д. с. вспомогательного источника тока. Принципиальная схема компенсационного прибора изображена на рис. 173. Ток от вспомогательного источника (аккумулятора или сухого элемента) течет в цепи, в которую включено между точками *I* и *II* сопротивление *R*, называемое реохордом, состоящее из калиброванной проволоки длиною *L см*.

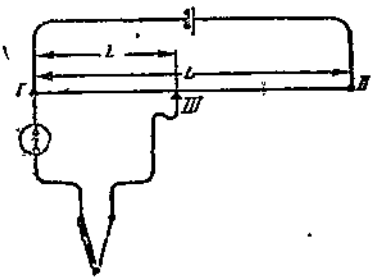


Рис. 173. Принципиальная схема потенциометра:
I—II — реохорд.

Если обозначить силу тока в реохорде через i, то по закону Ома разность потенциалов между точками I и II будет $E = iR$, а разность потенциалов между точкой I и любой промежуточной точкой III, отстоящей от точки I на расстояние l, будет $e = ir$, где r — величина сопротивления участка проволоки между точками I и III. Из этих равенств получим:

$$e = E\frac{r}{R}. \qquad (178)$$

При калиброванной проволоке равного сечения и удельного сопротивления ρ можно написать $r = \rho\frac{l}{f}$ и $R = \rho\frac{L}{f}$, подставляя значения r и R в уравнение (178), получим:

$$e = E\frac{l}{L}. \qquad (179)$$

Таким образом, при постоянном значении E и L величина e определяется длиной l. Меняя положение точки III на реохорде, можно получить для e любое значение от нуля до величины E. К точке I присоединен один из полюсов термопары, другой полюс термопары присоединен к движку, скользящему по реохорду. В цепь термопары включен чувствительный гальванометр малого внутреннего сопротивления с нулем посредине шкалы. Подобный гальванометр называется нуль-прибором.

Включение термопары в цепь потенциометра производится так, чтобы направление э. д. с. термопары было противоположно направлению э. д. с. батареи. Иными словами, положительный полюс термопары присоединяется к положительному полюсу батареи.

Перемещением движка по реохорду можно найти такое его положение, при котором стрелка гальванометра устанавливается на нуль, т. е. в цепи термопары ток не проходит. Очевидно, что это будет в том случае, если разность потенциалов между точками реохорда, в которые включены полюса термопары, будет равна разности потенциалов термопары. Расстояние l движка от начальной точки реохорда определит числовое значение e.

Шкала реохорда градуируется в милливольтах. Постоянство и точность шкалы реохорда будут зависеть от постоянства значения разности потенциала E между концами реохорда (точки I и II). Исходя из этого, потенциометры устраиваются с возможностью контроля и регулировки значения E.

Простейшая схема такого потенциометра изображена на рис. 174. Потенциометр состоит из цепи вспомогательного источника тока, включающей в себя аккумулятор A, реостат R, постоянное сопротивление R_1, реохорд $I—II$ и выключатель B; цепи термопары T с нуль-прибором G и переключателем C и цепи нормального элемента Ne с кнопочным включателем B_1. В этой схеме реостат R служит для регулирования силы тока в цепи аккумулятора, а нормальный элемент для контроля постоянства разности потенциалов между конечными точками реохорда.

Нормальным элементом называется гальванический элемент, развивающий постоянную э. д. с. определенной величины. В настоящее время наиболее распространен нормальный элемент системы Вестона (рис. 175), состоящий из стеклянного сосуда в форме буквы Н. Обе вертикальные ветви сосуда запаяны с обоих концов. В нижние концы обеих ветвей впаяны платиновые проволоки, являющиеся полюсами элемента. В одной из ветвей налито

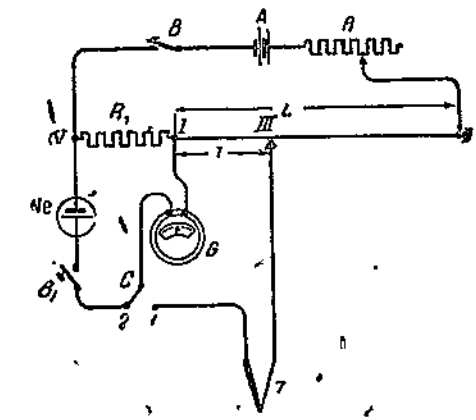


Рис. 174. Схема потенциометра:
A — аккумулятор; R — реостат; R_1 — постоянное сопротивление; I—II — реохорд; B — выключатель; T — термопара; G — нуль-прибор; C — переключатель; Ne — нормальный элемент; B_1 — кнопочный выключатель; 1, 2 — контакты переключателя.

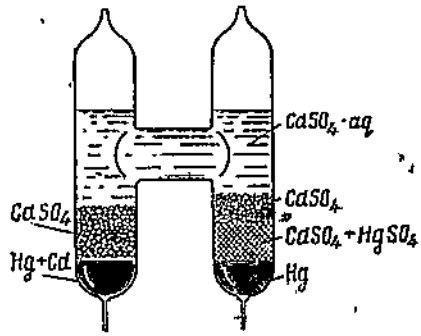


Рис. 175. Нормальный элемент Вестона.

небольшое количество ртути, поверх которой помещен слой пасты из кристаллов сернокислой закиси ртути и сернокислого кадмия.

Над пастой находится слой кристаллов чистого сернокислого кадмия. В другой ветви на дне находится слой кадмиевой амальгамы, покрытой слоем кристаллов сернокислого кадмия. Электролитом служит насыщенный при 4° раствор сернокислого кадмия. Электродвижущая сила такого элемента при 20° равна 1,0183 *в*.

При других температурах величина э. д. с. элемента определяется по формуле:

$$e_t = 1{,}0183 - 4{,}06 \cdot 10^{-5}\,(t-20) - 0{,}95 \cdot 10^{-6}\,(t-20)^2 - \\ - 0{,}1 \cdot 10^{-7}\,(t-20)^3. \qquad (180)$$

Нормальный элемент сохраняет указанное значение э. д. с. при малых и кратковременных нагрузках. Поэтому во всех приборах нормальный элемент включается в цепь выключателем кнопочного типа. Пользуясь нормальным элементом, возможно совершенно точно установить постоянство разности потенциалов на концах реохорда. Выполняется это следующим образом.

Переключатель C (рис. 174) переводят на контакт 2, включая этим нуль-прибор G в цепь нормального элемента и одновременно разрывая цепь термопары. Выключателем B замыкают цепь аккумулятора, затем кратковременным нажимом на кнопочный выключатель B_1 включают нормальный элемент, наблюдая при этом за поведением стрелки нуль-прибора. Если стрелка нуль-прибора отклонилась при этом от нулевого положения, отпускают кнопку и передвигают движек реостата R в ту или другую

сторону в зависимости от направления отклонения стрелки нуль-прибора. Вновь нажимом на кнопку включают нормальный элемент, наблюдая отклонение стрелки нуль-прибора, повторяя эти операции до тех пор, пока при нажиме кнопки выключателя B_1 стрелка нуль-прибора не будет оставаться на нуле шкалы. При этом, очевидно, разность потенциалов на концах сопротивления будет равна э. д. с. нормального элемента, т. е.

$$e_{IV-1} = e_{не}.$$

Тогда сила тока в цепи аккумулятора будет равна:

$$i = \frac{e_{IV-1}}{R_1} = \frac{e_{не}}{R_1}. \qquad (181)$$

Отсюда разность потенциалов на концах реохорда будет равна:

$$E = \frac{e_{не}}{R_1} R_2, \qquad (182)$$

где R_2 — сопротивление струны реохорда.

Так как $e_{не}$, R_1 и R_2 являются величинами постоянными, то и E будет постоянной величиной.

По окончании наладки прибора можно приступить к непосредственному измерению величины э. д. с. термопары. Для этого переключатель C переводят на контакт *1*, включая нуль-прибор в цепь термопары, и движком реохорда приводят к нулю стрелку нуль-прибора. Положение движка на шкале реохорда непосредственно укажет величину э. д. с. термопары в милливольтах.

Прибор, построенный по такой схеме, имеет определенный, довольно узкий предел измерений, определяемый значением E. Поэтому для увеличения предела измерений схема прибора для практического применения соответственно изменяется.

Потенциометрический способ измерения дает высокую точность результатов, так как при отсутствии тока в измеряемой цепи исключается влияние сопротивления термопары и подводящих проводов, а также большая часть ошибок указывающего прибора.

Поэтому при измерении потенциометром может быть достигнута точность порядка 0,01 и даже 0,001 *мв*.

Эти преимущества потенциометра не могли быть реализованы в производственном контроле, так как измерение требовало сложных манипуляций квалифицированного работника. Однако достоинства прибора заставили конструкторов приложить усилия для создания автоматически действующего потенциометра.

В настоящее время имеется несколько систем автоматически действующих потенциометров, получивших применение в промышленности. В СССР завод «Пирометр» изготовляет автоматические потенциометры промышленного типа, регистрирующие и регулирующие температуру.

Принцип действия автоматического потенциометра заключается в следующем. Термопара переключателем, работающим от

электромотора, встроенного в прибор, периодически присоединяется к схеме потенциометра. Вслед за этим через короткий промежуток времени падающая дужка нажимает на стрелку нуль-прибора. При каждом нажатии дужки, в зависимости от направления и величины отклонения стрелки нуль-гальванометра, мотор передвигает движок реохорда на некоторую величину, пропорциональную отклонению стрелки. Передвижение движка реохорда продолжается при каждом нажиме дужки до уравновешивания потенциометра. Указывающая стрелка и записывающее перо передвигаются горизонтально вдоль шкалы и бумажной ленты в зависимости от перемещения движка реохорда.

На рис. 176 изображен перспективный вид механизма автоматического потенциометра. Для ясности взаим-

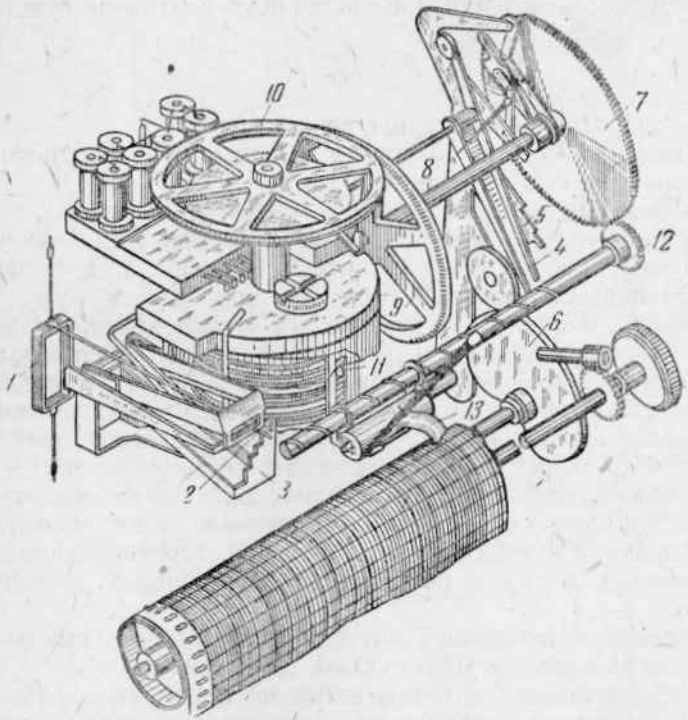


Рис. 176. Схема механизма автоматического потенциометра:
1 — нуль-гальванометр; *2* — стрелка нуль-гальванометра; *3* — селекторная доска; *4* — повторительная стрелка; *5* — ступенчатый рычаг; *6* — эксцентрик; *7* — зубчатое колесо; *8* — ось передачи; *9* и *10* — коническая передача; *11* — движок реохорда; *12* — шестерня; *13* — перо.

ное, расположение частей несколько изменено. Импульс для работы аппарата создает положение стрелки *2* нуль-гальванометра *1*. При каждом нажатии дужки, происходящем через 15—20 сек.,

к стрелке гальванометра прижимается ступенчатая селекторная доска *3*. Угол поворота оси, скрепленной с доской, а следовательно, и положение повторительной стрелки *4* определяется положением стрелки гальванометра и той ступенькой доски, которая встречается со стрелкой. Эксцентрик *6*, вращающийся от мотора, приводит ступенчатый рычаг *5* в колебательное движение, так что каждому нажиму селекторной доски на стрелку гальванометра соответствует одно колебание рычага *5*. Длина хода рычага *5* определяется положением повторительной стрелки *4*, в которую он упирается той или другой ступенькой. С рычагом *5* связана система храповичков, захватывающих зубчатое колесо *7*, поворачивая его на угол, зависящий от длины хода рычага *5*. Вместе с колесом *7* поворачивается жестко связанная с ним ось *8*, несущая на другом конце коническую шестерню *9*, сцепляющуюся с конической шестерней *10* оси реохорда.

Поворотом оси изменяется положение движка *11*, приводя потенциометр к равновесию.

С зубчатым колесом *7* сцеплена шестерня *12*, вращающая ось с крутой винтовой нарезкой, по которой движется каретка с указателем и пером *13*.

Реохорд потенциометра (рис. 177) представляет собой бакелитовый барабан с винтовой нарезкой на боковой поверхности. Проволока реохорда длиною 1 *м* уложена в канавки нарезки. Движок реохорда представляет собой металлический шарик, перемещающийся при повороте кулиссы *А* вокруг барабана одновременно по винтовому желобку барабана и продольному прорезу кулиссы. Весь реохорд помещен в стеклянном сосуде, заполненном маслом.



Рис. 177. Реохорд автоматического потенциометра: *А* — кулисса движка.

По тому же типу построен автоматический равновесный мостик, применяемый при измерении термометрами сопротивления.

34. Установка термоэлектрических пирометров

Термоэлектрический пирометр состоит из термопары, гальванометра или потенциометра и соединительных проводов. Установка термопары в месте измерения была описана выше. Здесь рассматривается вопрос о комплектной установке пирометра.

Гальванометр или потенциометр должны быть установлены в месте, удобном для наблюдения их показаний. Выбранное место для измерительного прибора должно удовлетворять следующим требованиям:

Место установки приборов должно иметь более или менее постоянную температуру без резких колебаний.

Приборы должны быть защищены от прямого нагревания солнечными лучами или лучеиспусканием от печей, сильно нагретых аппаратов и трубопроводов.

Приборы не должны подвергаться сотрясениям и толчкам.

Приборы должны быть защищены от пыли и агрессивных газов и паров. В пыльных помещениях или в помещениях с агрессивными газами и парами следует помещать приборы в застекленные шкафчики, внутри которых иметь сосуд с соответствующим поглотителем.

При размещении гальванометров следует учесть возможное влияние металлических масс, магнитов и сильных токов на магнитное поле гальванометра. Неэкранированные приборы не должны устанавливаться на железных или чугунных подставках и колонках. Установка нескольких гальванометров на одном щите допустима при их экранировке либо размещении на расстоянии 400—500 *мм* один от другого. В противном случае гальванометры необходимо подвергнуть специальной градуировке в условиях монтажа.

Для правильности измерений температур термоэлектрическими приборами наиболее важно поддержание постоянной температуры холодного спая. Несоблюдение этого условия является наиболее частой причиной ошибок измерения. Постоянство температуры холодного спая достигается применением компенсационных проводов и термостатов.

Назначение компенсационных проводов — удалить холодный спай от головки термопары возможно дальше, чтобы устранить влияние высокой температуры места измерения. Компенсационные провода для термопар из неблагородных металлов изготовляются из тех же материалов, что и электроды. К термопарам из благородных металлов компенсационные провода изготовляются из специальных сплавов, не дающих термоэлектрического эффекта с материалами электродов термопары. Компенсационные провода выполняются в виде двухжильного кабеля в общей оплетке. Обе жилы изолируются обмотками разных цветов. Присоединение компенсационных проводов к головке термопары должно быть выполнено правильно, т. е. каждый из проводов должен быть присоединен к соответствующему электроду. Неправильное присоединение ведет к значительным ошибкам измерения вследствие возникновения паразитных термопар в головке пирометра.

В случае сомнения проверка правильности присоединения производится пробным переключением проводов в головке термопары. Правильным присоединением будет то, при котором показание гальванометра будет больше.

Компенсационные провода проводятся до точки, где температура остается постоянной с очень малыми колебаниями. Дальнейшая проводка к измерительному прибору выполняется медными проводами. Когда это не имеет места, постоянство температуры холодных спаев обеспечивается применением термостата, поддерживающего температуру концов компенсационных проводов постоянной.

В качестве термостатов применяются:

а) Металлические коробки, внутри которых укреплены на основании из изолирующего материала клеммы для присоединения компенсационных и медных проводов. Коробка имеет двойные стенки и охлаждается проточной водой. Такой термостат применим в тех случаях, когда имеется вода с постоянной температурой в течение всего года (вода источников или артезианских колодцев).

б) Литые чугунные коробки, залитые изоляционной массой (чаттертоном и др.). Большая тепловая инерция этих коробок сглаживает колебания температуры помещения, если эти колебания не особенно велики.

в) Термостатные коробки, выполненные по типу сосудов Дьюара, помещенные в толстостенный литой кожух. Эта конструкция, обладая весьма большой тепловой инерцией, сглаживает довольно значительные колебания внешней температуры.

г) Термостатные коробки с подогревом. Так как абсолютная величина температуры холодного спая не имеет значения и влияет только на первоначальную градуировку гальванометра (важно лишь постоянство температуры), то применяют термостат с автоматическим подогревом. Термостат подогревается электрическим сопротивлением, включенным в осветительную сеть. Температура поддерживается несколько выше окружающей среды; постоянство ее регулируется биметаллическим терморегулятором, включающим и выключающим нагреватель.

д) Кроме специальных термостатов можно использовать и используется на практике постоянство температуры глубоких слоев почвы.

На глубине 4—5 *м* колебания температуры почвы в течение года не превышают 1—2°, т. е. практически температура остается постоянной. В почву на глубину 5—6 *м* вбивается или вкапывается железная труба с заваренным концом. В эту трубу погружается хорошо изолированный холодный спай термопары. Труба заливается чаттертоном и закрывается колпаком для защиты от загрязнения.

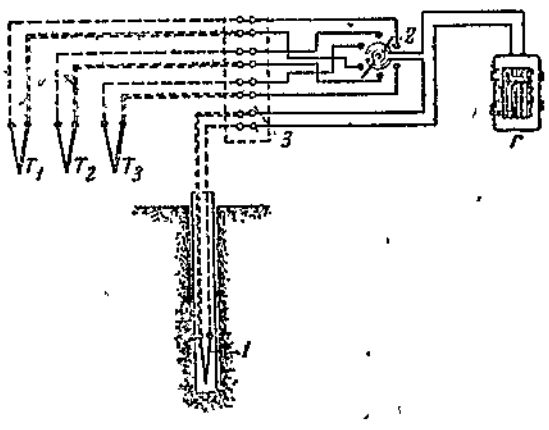


Рис. 178. Почвенное термостатирование нескольких термопар:

T_1, T_2, T_3 — термопары; *1* — термостатирующая термопара; *2* — двухполюсный переключатель; *3* — коробка холодных спаев; *Г* — гальванометр.

На рис. 178 изображена установка с термостатированием в почве для нескольких термопар. В этом случае в трубу поме-

щается термопара *1* из тех же материалов, как остальные, подключаемая через переключатель *2* последовательно в цепь каждой термопары, но навстречу последней. Для обеспечения постоянства температур точек присоединений медных проводов компенсационные провода подведены к общей коробке *3*, температура которой не отражается на точности измерений.

Несмотря на простоту способа почвенного термостатирования особенно рекомендовать его нельзя, так как независимо от принимаемых мер в трубе может скопляться влага, портящая изоляцию электродов и вносящая неучитываемые ошибки. Контроль значения температуры холодного спая при этом способе также затруднителен, что вносит некоторую неуверенность в измерения.

Так как гальванометр по существу измеряет не э. д. с., а силу тока, то для правильности измерений необходимо, чтобы величина сопротивления внешней цепи (термопары компенсационных и соединительных проводов) была равна величине сопротивления при градуировке гальванометра. Эта величина указывается на гальванометре и к ней должно быть подогнано сопротивление цепи при помощи подгоночной катушки.

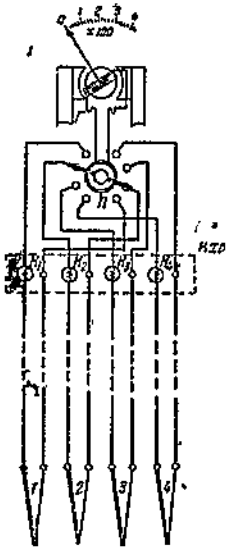


Рис. 179. Схема присоединения нескольких термопар к гальванометру: *1, 2, 3, 4* — термопары; K_1, K_2, K_3, K_4 — уравнительные катушки; *Кхс* — коробка холодных спаев, *П* — переключатель; *Г* — гальванометр.

Соединительные провода современных пирометрических установок несмотря на минимальную силу тока, измеряющуюся миллиамперами, представляют чрезвычайно ответственную часть системы. Кроме условия минимального сопротивления должна быть обеспечена тщательная изоляция, гарантирующая отсутствие заземлений и гальванических явлений в проводах. Проводка должна выполняться проводами диаметром не менее 2 *мм* в гуперовской изоляции, проложенными во избежание механических повреждений в железных трубах. Особое внимание должно быть обращено на снижение переходных сопротивлений в клеммах, местах соединений и переключателях. В качестве переключателей должны применяться двухполюсные переключатели специального типа. Однополюсные переключатели, как правило, применять недопустимо.

На рис. 179 изображено схематически присоединение четырех термопар к гальванометру.

Поверка и градуировка термопар. Поверку и градуировку термопар приходится производить периодически, если желательно сохранение первоначальной точности измерений. Термопары, особенно работающие при высокой температуре, постепенно портятся от окисления, разъедания газами и изменения структуры термоэлектродов. Термопары неблагородных металлов, непрерывно работающие при температуре 1000° и выше, должны подвергаться еженедельной поверке для поддержания надлежащей точности измерений.

Поверка термопар чаще всего производится путем сравнения показаний испытуемой термопары с эталонной платиновой термопарой. Наиболее трудной задачей в операции поверки является уравнение температур эталонной и испытуемой термопары. В качестве нагревателя применяется обычно трубчатая электропечь. Электропечь состоит из шамотной или фарфоровой трубы 500 *мм* длины и 40—50 *мм* диаметром, обмотанной снаружи нихромовой (для температур до 800°) или платиновой (до 1200°) проволокой, представляющей нагревательное сопротивление. Обмотка делается на длине 40 *см*, причем к обоим концам трубы витки обмотки располагаются теснее, чтобы уменьшить влияние свободных концов трубы на распределение температур по длине трубы. Обмотка покрывается слоем изолирующей обмазки из каолина с асбестом, набиваемой между витками во избежание их замыкания между собой. Труба заключается в железный кожух диаметром 150 *мм*. Пространство между трубой и стенками кожуха заполняется кизельгуром или иной жароупорной изолирующей массой.

Для возможного уменьшения конвекционных токов труба обязательно располагается горизонтально. Термопары, испытуемые и эталонные без оправы помещаются внутрь трубы, так чтобы их спаи находились на середине длины трубы печи. Оба отверстия трубы закрываются асбестовыми пробками. Несмотря на эти предосторожности одинаковая температура спаев обеих термопар не гарантирована, так как условия теплопередачи к обеим термопарам в общем случае могут быть различны.

Наиболее надежный способ получения одинаковой температуры спаев — помещение спая эталонной платиновой термопары в узкий пропил, сделанный в спае испытуемой термопары из неблагородных металлов.

В случае проверки платиновой термопары следует спаять спаи обеих термопар. Другим способом, обеспечивающим одинаковую температуру спаев обеих термопар, будет помещение в трубу электропечи медной, алюминиевой или стальной цилиндрической болванки с просверленными глухими каналами диаметром 10—12 *мм*, в которые вводятся эталонная и испытуемая термопары в изолирующей оболочке из фарфоровых трубок.

Холодные спаи термопар погружаются в термостат с тающим льдом. Измерения э. д. с. обеих термопар производятся точным милливольтметром высокого сопротивления или переносным потенциометром с пределами измерения 10—70 *мв*. Присоединение термопар к измерительному прибору производится двухполюсным переключателем.

ГЛАВА VIII

ТЕРМОМЕТРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ

35. Материалы термометров сопротивления

Общие сведения. Измерение температуры термометрами сопротивления основано на свойстве металлических проводников изменять сопротивление прохождению электрического тока при изменении температуры проводника. Температурный коэфициент электросопротивления металлов положителен, т. е. сопротивление проводника возрастает при повышении его температуры. Таким образом, омическое сопротивление проводника представляет некоторую функцию его температуры: $R_t = f(t)$. Вид этой функции определяется природой металла и степенью его чистоты.

Измеряя сопротивление нагретого проводника одним из известных методов и зная вид функции для данного металла, можно определить его температуру, а следовательно, и температуру пространства или среды, в которую он помещен.

Особое преимущество термометров сопротивления заключается в обеспечении высокой точности измерений. Недостаток их, по сравнению, например, с термоэлектрическими пирометрами, выражается в необходимости иметь источник питания током.

Технический предел измерения термометрами сопротивления 400—500°, так как при более высоких температурах предпочтительнее употреблять термоэлектрические пирометры.

Неудобство термометров сопротивления заключается также в невозможности измерения температуры в отдельных точках, однако этот недостаток превращается в достоинство в тех случаях, когда необходимо измерить среднюю температуру площади или пространства. Растянув соответственно измерительную проволоку, можно получить непосредственно среднюю температуру.

Выбор материалов. При выборе материалов для термометров сопротивления необходимо руководствоваться следующими требованиями:

а) материал должен быть физически и химически устойчив при рабочих температурах;

б) температурный коэфициент сопротивления материала должен быть возможно высок;

в) материал должен обладать свойством воспроизводимости для возможности смены измерительной части;

г) сопротивление материала при температуре градуировки не должно изменяться со временем;

д) изменение сопротивления с температурой должно проходить к линейному закону без резких отклонений и явлений гистерезиса.

Первому условию лучше всего удовлетворяет платина, совершенно стойкая до температуры в 1000°, выше которой наступает явление распыления платины с изменением сопротивления. При невысоких температурах медь, железо и никель также вполне устойчивы.

Второе условие легко выполнимо на практике при применении чистых металлов. Благоприятнее других металлы железной группы — железо, никель и кобальт.

Третье условие наиболее трудно выполнимо, так как воспроизводимость достигается лишь при употреблении совершенно чистых металлов. Малейшая примесь резко изменяет температурный коэфициент сопротивления. Никель, железо и кобальт, наиболее подходящие с точки зрения второго условия, хуже всего удовлетворяют третьему, так как получение их в чистом виде крайне трудно. Практически их приходится считать невоспроизводимыми.

Четвертое условие легко выполняется для всех чистых металлов.

Наконец, пятое условие не всегда выполняется. Сопротивление металлов резко изменяется в так называемых точках превращения. Для железа первая точка превращения лежит около 750°, но так как железо при этой температуре не может применяться вследствие малой стойкости, то для него это обстоятельство не имеет значения. Для никеля точка превращения лежит между 300 и 400°. В этих пределах никелевый термометр дает разные показания при повышении и понижении температуры, что необходимо иметь в виду и избегать применение никелевого термометра сопротивления в этом диапазоне температур.

Принципиально величина сопротивления не играет роли, и измерение температуры может быть выполнено любым достаточно большим сопротивлением. Практические соображения требуют выбора сопротивления термометра не слишком большим и не слишком малым. Обычно термометры сопротивления для технических целей делаются в 50 и 100 *ом* при 0°. В особых случаях приходится отступать от этой нормы.

При очень длинных подводящих проводах применяются термометры более высокого сопротивления (200—500 *ом*), уменьшающего влияние сопротивления соединительных проводов. Однако термометры высокого сопротивления требуют либо очень тонкой проволоки, либо большой длины ее. Первое делает термометр недолговечным, а второе создает большие габариты измерителя. Поэтому выше 100 *ом* термометры не следует делать.

При научных измерениях желательно применение более толстой проволоки (более долговечной и устойчивой) при малых габаритах измерителя. Поэтому в этих случаях приходится довольствоваться меньшей величиной сопротивления (10—20 *ом*), а в особых случаях даже величинами в 1—2 *ом*. Такие малые величины сопротивлений требуют специальных мер для компенсации

влияния подводящих проводников и очень точных методов измерений.

Измерение температуры термометром сопротивления сводится к измерению величины сопротивления и во всех случаях требует постороннего источника тока. Измерительные приборы, применяемые для этой цели, по принципу действия делятся на три группы:

1. Равновесные мосты Уитстона.
2. Неравновесные мосты Уитстона.
3. Логометры (омметры).

Эти приборы выполняются в виде указывающих, регистрирующих и регулирующих приборов и применяются для промышленного контроля процессов производства.

Платиновый термометр сопротивления. Изменение сопротивления платины с изменением температуры выражается трехчленом:

$$R_t = R_0(1 + at + bt^2), \qquad (183)$$

где R_0 и R_t — сопротивление платины при 0° и температуре t°;
a и b — константы;
t — температура.

Для определения констант a и b необходимо измерить сопротивление платины в трех точках: при 0, 100 и 444,5° (температуре кипения серы). Пригодность платины для изготовления термометров определяется из условий, чтобы:

$$\delta = \frac{b \cdot 10^4}{a - b \cdot 10^2} \leqslant 1{,}52 \qquad (184)$$

и

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0} \geqslant 0{,}388. \qquad (185)$$

Относительные значения сопротивления платины при $\delta = 1{,}50$ и $\alpha = 0{,}392$ даны в табл. 11.

Таблица 11

Значения сопротивления платины

Температура °С	R_t	Температура °С	R_t	Температура °С	R_t
— 193	0,20292	0	1,00000	400	2,4984
— 1 0	0,38755	100	1,3920	500	2,844
— 100	0,59610	200	1,7725	600	(3,134)
— 50	0,79989	300	2,1412	700	(3,4-6)*

Примечание. Величины сопротивления при 500 и 700°, взятые в скобки, относятся к другому образцу платины.

До градуировки проволока должна быть прокалена при 1000—1200°, чтобы сопротивление и температурный коэфициент стали постоянными.

Платиновые термометры сопротивления изготовляются обычно из проволоки диаметром около 0,1 *мм*. Для высоких температур целесообразнее брать проволоку 0,2—0,4 *мм* диаметром, в исключительных случаях 0,6 *мм*. Для точных измерений необходимо, чтобы платиновая проволока была намотана без всяких напряжений.

Элемент сопротивления платинового термометра завода «Пирометр» (рис. 180) выполнен из платиновой проволоки диаметром 0,07 *мм*, бифилярно

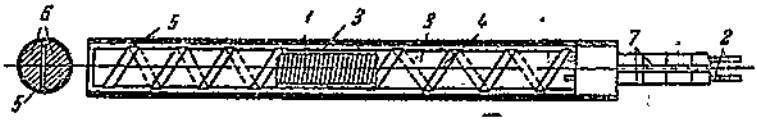


Рис. 180. Элемент сопротивления платинового термометра:

1 — слюдяной каркас намотки; *2* — серебряные выводы намотки; *3* — слюдяные накладки; *4* — скрепляющая намотка; *5* — защитная трубка; *6* — алюминиевые вкладыши; *7* — изолирующие фарфоровые трубки.

намотанной на слюдяную полоску с зубчатыми краями *1* длиной 150 *мм*. В прорезах слюдяной полоски укреплены концы серебряных выводов *2*, к которым припаяны концы платиновой проволоки элемента сопротивления. Платиновая проволока, намотанная на слюдяную полоску, изолирована с двух сторон слюдяными накладками *3*, скрепленными обмоткой из серебряной ленточки *4*. Весь этот пакет помещен в металлический трубчатый защитный чехол *5* из нержавеющей стали. Свободное сечение трубки с обеих сторон пакета элемента сопротивления заполнено по всей его длине алюминиевыми вкладышами *6*. Проволоки выводов изолированы фарфоровыми трубочками *7*. Защитный чехол помещен в наружную арматуру, состоящую из стальной трубы с заваренным дном, штуцерной гайки и алюминиевой головки, в которой на бакелитовом вкладыше укреплены контактные зажимы для присоединения проводов. Место ввода проводов в головку может быть уплотнено сальником.

Сопротивление термометра при 0°, измеренное на зажимах головки, равно $R_0 = 46 \pm 0{,}05$ ома.

Платиновый термометр не пригоден для работы в условиях вибрации установки. Термометры этого типа при правильной установке и монтаже дают точность измерений до $\pm 1{,}5\%$ от интервала шкалы.

Платиновый термометр более прочного типа выполняется фирмой Гереус. На стержень из кварцевого стекла диаметром 3 *мм* наматывается сопротивление из проволоки диаметром 0,05 *мм*. Обмотанный стержень вплавляется в тонкостенную кварцевую трубку подходящего диаметра. В результате платиновая обмотка со всех сторон защищена кварцем от воздействия внешней среды. Эта конструкция применяется в промышленных термометрах для температур до 600°. Вследствие необходимости вплавлять проволоки в кварц намотка не свободна от напряжений, что несколько понижает точность термометра. Однако ошибки незначительны и лежат в пределах погрешности технических измерений.

Платиновые термометры сопротивления в СССР выпускаются для измерений в пределах от —120 до +500°.

Градуировочные данные одного из платиновых термометров приведены в табл. 12.

Таблица 12

Платиновый термометр (Pt-11)

Температура °С	Сопротивление ом	Температура °С	Сопротивление ом	Температура °С	Сопротивление ом	Температура °С	Сопротивление ом
—120	23,46	10	47,82	140	71,03	270	93,35
—110	25,55	20	49,64	150	72,78	280	95,07
—100	27,44	30	51,45	160	74,52	290	96,70
— 90	29,33	40	53,26	170	76,26	300	98,37
— 80	31,21	50	55,06	180	77,99	320	101,69
— 70	33,08	60	56,86	190	79,72	350	106,63
— 60	34,95	70	58,65	200	81,44	370	109,90
— 50	36,80	80	60,43	210	83,16	400	114,76
— 40	38,65	90	62,21	220	84,87	420	117,97
— 30	40,50	100	63,99	230	86,58	450	122,76
— 20	42,34	110	65,76	240	88,28	470	125,92
— 10	44,17	120	67,52	250	89,97	500	130,62
— 0	46,00	130	69,28	260	91,66	—	—

Медные термометры сопротивления, изготовляемые в СССР, предназначены для измерения температур от —50° до +150°. Сопротивление при 0° независимо от длины и типа составляет 53 ± 0,1 ома.

В табл. 13 приведены градуировочные данные медного термометра.

Таблица 13

Медный термометр (Си-2)

Температура °С	Сопротивление ом	Температура °С	Сопротивление ом	Температура °С	Сопротивление ом
—50	41,74	20	57,51	90	73,27
—40	43,99	30	59,76	100	75,53
—30	46,24	40	62,01	110	77,78
—20	48,50	50	64,28	120	80,03
—10	50,75	60	66,52	130	82,28
0	53,00	70	68,77	140	84,54
+10	55,25	80	71,02	150	86,79

Элемент сопротивления медного термометра завода «Пирометр» выполнен из эмалированной медной проволоки, намотанной на металлический трубчатый каркас по бумажной изоляции. Катушка заключена в тонкостенную металлическую трубку с запаянным дном. Выводы изолированы бакелитовыми трубками и присоединены к зажимам в головке арматуры. Арматура аналогична наружной арматуре платиновых термометров.

Точность измерений при правильном монтаже и нормальных условиях работы достигает ± 1,0—1,5% интервала шкалы. Медные термометры могут применяться на установках с вибрацией

и толчками. Соединение термометров сопротивления с измерительными устройствами выполняется с помощью медных проводов.

При градуировке логометра или гальванометра по табл. 12 и 13 необходимо учитывать сопротивление соединительных проводов, обычно принимаемое равным 5 ом. Эту величину нужно добавить к табличным данным и полученную величину набирать на магазине сопротивлений, подключаемом при градуировке вместо термометра. Сопротивление проводов, соединяющих магазин сопротивлений с градуируемым прибором, должно быть как можно меньше, или величину этого сопротивления необходимо учесть, уменьшая соответственно набираемое сопротивление.

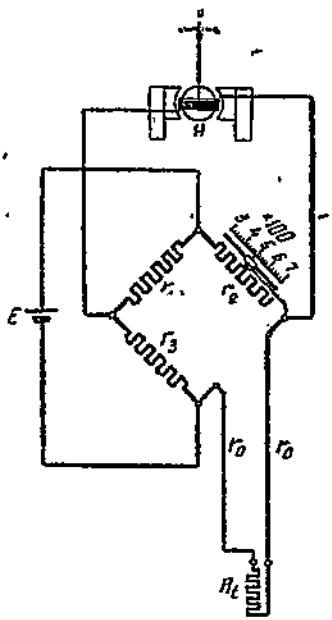


Рис. 181. Схема равновесного мостика Уитстона: r_1 и r_3 — постоянные сопротивления; r_2 — переменное сопротивление; R_t — сопротивление термометра; r_0 — сопротивление соединительных проводов; E — источник тока; H — нуль-гальванометр.

36. Мосты Уитстона

Равновесный мост Уитстона. Принципиальная схема равновесного моста Уитстона изображена на рис. 181. Равновесный мост состоит из двух постоянных сопротивлений r_1 и r_3, переменного сопротивления r_2 и термометра сопротивления R_t, включенного в четвертую ветвь моста. К сопротивлению термометра присоединяется сопротивление двух соединительных проводов $2r_0$ и сопротивление уравнительной катушки $r_к$. Таким образом, сопротивление четвертой ветви моста равно $R_t + 2r_0 + r_к$. В одну из диагоналей моста включается источник тока E, в другую диагональ — гальванометр H с нулем, расположенным посредине шкалы,—так называемый нуль-прибор.

Как известно, для равновесия моста необходимо, чтобы:

$$r_1 (R_t + 2r_0 + r_к) = r_2 \cdot r_3,$$

отсюда

$$R_t = r_2 \frac{r_3}{r_1} - (2r_0 + r_к). \qquad (186)$$

Так как r_3, r_1, $2r_0$ и $r_к$ являются постоянными, то уравнение можно написать:

$$R_t = kr_2 - k_1. \qquad (187)$$

Это уравнение показывает, что при изменении сопротивления R_t мост может быть приведен к равновесию изменением величины

сопротивления r_2. Выполнив сопротивление r_2 в виде реохорда, можно на шкале движка нанести деления в омах или в градусах температуры. Достижение равновесия устанавливается по отсутствию тока в гальванометре, т. е. по положению стрелки на нуле шкалы.

Равновесный мост представляет собой измеритель высокой точности, однако его применение требует определенных, хотя и несложных манипуляций.

Неравновесный мост Уитстона. Если в схеме равновесного моста не передвигать движок сопротивления r_2, то при изменении температуры равновесие моста нарушится и через гальванометр потечет ток. Сила тока, а, следовательно, отклонение стрелки гальванометра будет тем больше, чем сильнее нарушено равновесие моста.

Сила тока, текущего по диагонали гальванометра моста, определяется уравнением:

$$I_r = \frac{e(r_1 R_t - r_2 r_3)}{r_r (r_1 + r_3)(r_2 + R_t) + r_1 r_3 (r_2 + R_t) + r_2 R_t (r_1 + r_3)}, \quad (188)$$

где r_r — сопротивление гальванометра;

I_r — сила тока в цепи гальванометра;

e — разность потенциалов на вершинах моста.

Из этого уравнения вытекает, что для малых изменений R_t сила тока возрастает почти линейно с ростом сопротивления. При большом же возрастании сопротивления увеличение силы тока замедляется вследствие увеличения знаменателя дроби. Поэтому при больших диапазонах измерений деления шкалы уменьшаются в области высоких температур.

Из уравнения (188) видно также, что сила тока прямо зависит от величины e — разности потенциалов на вершинах моста. Поэтому необходимым условием правильности измерений будет поддержание разности потенциалов постоянной.

Осуществляется это введением регулировочного реостата в цепь аккумулятора, питающего схему. Для контроля величины разности потенциалов применяется с х е м а, представленная на рис. 182. В цепь питания моста включен регулировочный реостат R, а в четвертую ветвь моста параллельно термометру включено манганиновое сопротивление r, величина которого равна сопротивлению термометра при определенной температуре. Переключатель $к$ позволяет включить в схему моста либо термометр, либо сопротивление $r_к$. Температура, соответствующая величине $r_к$, отмечена на шкале гальванометра красной чертой. Если разность потенциалов отвечает норме, стрелка гальванометра, при включении сопротивления $r_к$ вместо термометра, встанет на красную черту. При меньшей разности потенциалов стрелка гальванометра не дойдет до красной черты, при большей — перейдет за нее. Для установления нормальной разности потенциалов необхо-

димо привести стрелку гальванометра на красную черту движком реостата R. После этого переключатель переводится на термометр. Проверку разности потенциалов следует производить раза два в сутки. Если при полностью выведенном реостате R стрелка гальванометра все же не доходит до красной черты, необходимо сменить источник питания.

Гальванометр неравновесного моста может иметь несколько температурных шкал, т. е. мост может быть приспособлен к нескольким пределам измерений (например, 0—150; 100—300; 250—500). Это выполняется секционированием сопротивления r_2 или включением в третью ветвь моста нескольких параллельных сопротивлений — r_2', r_2'', r_2''', поочередно включаемых переключателем.

Чем уже предел измерений, тем чувствительнее должен быть гальванометр, так как приращение силы тока в цепи гальванометра пропорционально приращению сопротивления. Чувствительность неравновесных мостов с гальванометрами с горизонтальной осью может быть доведена до возможности измерений в пределах 30—50°. Применением приборов с подвесной рамкой предел измерений может быть доведен до 10° и ниже.

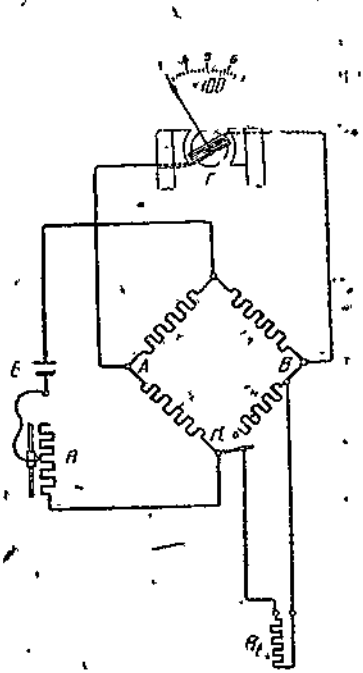


Рис. 182. Схема неравновесного мостика Уитстона:

r_1, r_2, r_3 — постоянные сопротивления ветвей мостика; R — регулировочный реостат; $r_к$ — контрольное манганиновое сопротивление; R_t — сопротивление термометра; $К$ — переключатель; $Г$ — гальванометр; $Е$ — источник тока.

Равновесно-неравновесный мост объединяет в одном приборе признаки равновесного и неравновесного мостов. Если в схеме рис. 181 нуль-аппарат снабдить шкалой, градуированной в градусах Цельсия, то отклонение стрелки будет не только констатировать неравновесность моста, но одновременно указывать, на сколько градусов температура термометра отличается от температуры, соответствующей равновесию, указываемой движком r_2. При чувствительном нуль-аппарате температурная шкала не может быть точной, однако в данном случае это не имеет серьезного значения. Прибор, построенный по принципу равновесно-неравновесного моста, удобен тем, что показывает, насколько температура, измеряемая термометром, отличается от заданной.

Установив движок моста на заданную температуру процесса, можно быть уверенным, что температура эта выдерживается, если стрелка нуль-аппарата стоит на нуле. Отклонение стрелки будет сигнализировать об отклонении температурного режима от заданного и приблизительную величину этого отклонения. Точную температуру можно определить по шкале движка, приведя стрелку нуль-прибора к нулю. Регулировки напряжения можно не производить, так как ошибка в величине отклонения на 5—10% не имеет значения, а при приведении моста к равновесию влияние напряжения исключается.

На рис. 183 изображен равновесно-неравновесный мост фирмы Brown Instr. Co. Весь мост помещен в корпусе нуль-прибора, на передней стенке которого находятся рукоятка и шкала движка и эксцентричная шкала нуль-гальванометра. Прибор имеет четыре клеммы: две внизу для присоединения термометра и две вверху для присоединения аккумулятора.

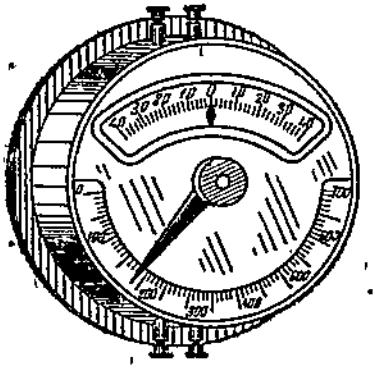


Рис. 183. Равновесно-неравновесный мостик Brown Instr. Co.

37. Измерение температур логометром

В практике измерений кроме мостовых схем часто применяются специальные приборы для измерения сопротивлений, носящие названия омметров и логометров.

Омметр Бруггера, схема которого изображена на рис. 184, является магнитоэлектрическим прибором, аналогичным гальванометру Депре д'Арсонваля, отличаясь от него устройством подвижной системы и сердечника. Подвижная система логометра состоит из двух рамок G_1, G_2, скрещенных под некоторым углом. Ток к рамкам подводится так называемыми безмоментными вводами из тонкой серебряной ленты. Рамки вращаются в неравномерном магнитном поле, образованном наконечниками постоянного магнита с цилиндрической выточкой и эллиптическим или овальным сердечником. Такая форма сердечника создает воздушный промежуток изменяющейся ширины, и напряженность магнитного поля постепенно уменьшается по мере увеличения воздушного промежутка.

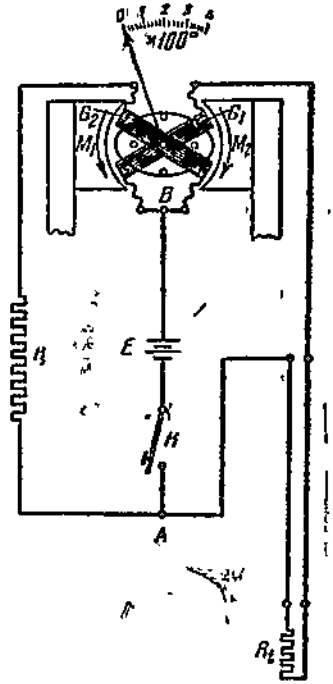


Рис. 184. Схема омметра Бруггера:

G_1 и G_2 — рамки омметра; E — источник питания; A — точка разветвления тока; R_t — сопротивление термометра; R — постоянное сопротивление.

Ток от источника E в точке A разветвляется на две параллельные цепи. Часть тока i_1 идет через термометр сопротивления R_t и рамку G_1, другая часть, i_2, идет через постоянное сопротивление R и рамку G_2. По выходе из рамок обе части тока соединяются в точке B и возвращаются к источнику тока.

Токи i_1 и i_2, проходя по рамкам G_1 и G_2 в противоположных направлениях, вызывают два противоположных вращающих момента, M_1 и M_2. Если сопротивления рамок равны между собой, то при равенстве сопротивлений R_t и R_t вращающие моменты также будут равны и система останется в покое. При повышении температуры термометра сопротивление R_t станет больше R и момент M_2 больше M_1. Подвижная система начнет поворачиваться в сторону рамки G_1, т. е. по часовой стрелке. При этом рамка G_2 будет передвигаться в более широкий воздушный промежуток с меньшим напряжением магнитного поля, а рамка G_1 с меньшим моментом в магнитное поле большего напряжения. Так как вращающие моменты прямо пропорциональны напряжению магнитного поля, то момент рамки G_2 начнет убывать, а момент рамки G_1 возрастать. В конце концов оба момента снова сравняются и подвижная система остановится в новом положении равновесия.

Всякому равновесному состоянию системы соответствует равенство:

$$M_1 = M_2$$

или

$$\frac{2r_1 l_1 n_1 H_1 i_1}{9810} = \frac{2r_2 l_2 n_2 H_2 i_2}{9810}, \qquad (189)$$

где H_1 и H_2 — напряжения магнитного поля в зонах расположения рамок.

Так как геометрические размеры рамок неизменны, то произведения $2r_1 l_1 n_1$ и $2r_2 l_2 n_2$ можно заменить постоянными C_1 и C_2. Уравнение (189) примет вид:

$$C_1 H_1 i_1 = C_2 H_2 i_2 \qquad (190)$$

или

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{C_2}{C_1}\frac{H_2}{H_1}, \qquad (191)$$

но

$$i_1 = \frac{E}{R_t + G_1}, \quad i_2 = \frac{E}{R + G_2}$$

где G_1 и G_2 — сопротивления рамок.

Подставляя значения i_1 и i_2 в ур-ние (190), получим:

$$\frac{R + G_2}{R_t + G_1} = C\frac{H_2}{H_1}. \qquad (192)$$

Из устройства прибора видно, что отношение $\frac{H_2}{H_1}$ есть функция угла поворота подвижной системы. Вид этой функции определяется формой полюсных наконечников и сердечника. Поэтому можно написать:

$$\frac{R + G_2}{R_t + G_1} = f(\varphi). \qquad (193)$$

Так как R, G_1 и G_2 постоянны, то:

$$\alpha = f(R_t). \qquad (194)$$

В ходе рассуждений выяснилось, что напряжение подверглось сокращению, а также что угол поворота системы зависит только от величины сопротивления R_t.

Сопротивление R выполняется из манганина, и величина его практически не зависит от температуры. Сопротивления рамок G_1 и G_2, сделанных из алюминия или меди, не постоянны при изменении температуры. Таким образом, омметр имеет температурный коэфициент, уменьшаемый, как в гальванометрах, последовательным включением в цепь рамок манганиновых сопротивлений; безмоментные вводы также вносят некоторое искажение. В связи с этим полной независимости показаний прибора от напряжения E, строго говоря, нет.

Шкала омметра градуируется в градусах температуры. Отсутствие пружинок исключает самостоятельное возвращение стрелки прибора к нулевому делению шкалы при выключении тока. Вследствие этого в омметрах и логометрах приходится вводить специальное устройство для возвращения стрелки к начальному делению шкалы.

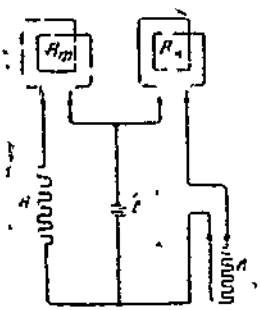


Рис. 185. Принципиальная схема логометра завода «Пирометр»:

R — постоянное сопротивление; R_t — сопротивление термометра; $R_к$ — рамка постоянного зазора; R_m — рамка переменного зазора; E — источник питания.

Недостаток омметра со скрещенными рамками заключается в малом центральном угле поворота подвижной системы, вследствие чего для получения более или менее крупных делений шкалы приходится увеличивать габариты прибора.

Логометры завода «Пирометр». Логометр, принципиальная схема которого изображена на рис. 185, представляет собою омметр с двумя рамками, расположенными в одной плоскости. Такое расположение рамок позволяет увеличить угол поворота системы до нормальной величины.

Подвижная система логометра (рис. 186) состоит из двух узких рамок *1* и *2*, жестко связанных металлическими накладками *3* и *4*. К верхней накладке *4* закреплена стрелка логометра *5*, снабженная усиками *6* с грузиками для балансировки системы. К обеим накладкам укреплены также муфточки *7* и *8* для закрепления полуосей *9* и *10*, на которых вращается подвижная система.

Подвижная система вращается в магнитном поле, образованном полюсными наконечниками постоянного магнита и трехгранным сердечником. Изменение вращающего момента осуществляется профилированием одной стороны сердечника, изменяющем действующую длину витков рамки (рис. 187).

Для возвращения стрелки логометра к начальному делению при выключении тока в конструкцию логометра введен электромагнитный возвратитель (рис. 188), состоящий из двух электромагнитов *2* и *6* и якоря *4* со стрелкой *5*. Стрелка на конце снабжена отростком, перпендикулярным к плоскости движения стрелки. Отросток может захватывать при движении стрелку логометра. Ось стрелки *5* соединена с плоской пружинкой (волоском) *3*, стремящейся повернуть стрелку *5* против часовой стрелки, отводя якорь *4* от полюсов электромагнитов *2* и *6*. При этом отросток стрелки возвратителя увлекает стрелку логометра к началу шкалы. При включении тока в систему логометра ток протекает по обмоткам *1* и *7*, электромагниты *2* и *6*, намагничиваясь, притягивают якорь *4*, перемещая стрелку *5* в крайнее левое положение, освобождая тем самым стрелку логометра. При выключении тока волосок передвигает стрелку *5* вправо. По пути последняя захватывает отростком стрелку логометра, возвращая ее к началу шкалы.

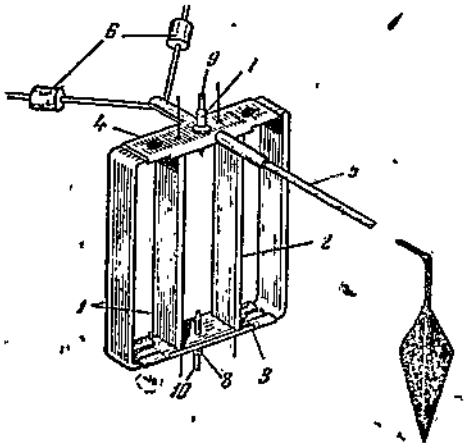


Рис. 186. Подвижная система логометра завода «Пирометр»:
1 и *2* — рамки логометра; *3* и *4* — скрепляющие накладки; *5* — стрелка; *6* — усики стрелки; *7* и *8* — муфточки для закрепления полуосей; *9* и *10* — полуоси.

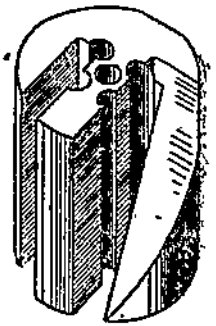


Рис. 187. Сердечник логометра.

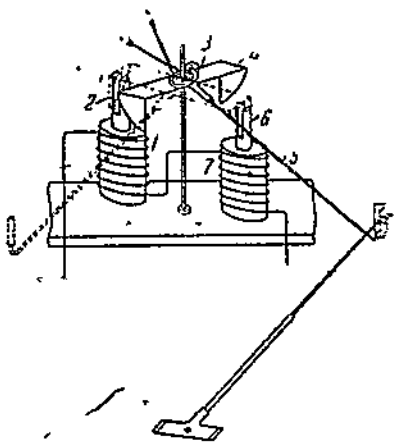


Рис. 188. Электромагнитный возвратитель стрелки логометра:
1 и *7* — обмотки электромагнитов; *2* и *6* — электромагниты; *3* — волосок; *4* — якорь; *5* — стрелка;

Для увеличения чувствительности прибора и равномерности его шкалы логометр включается в неравновесный мост Уитстона (рис. 189).

Завод «Пирометр» изготовляет:

а) Указывающий логометр (ЛМПУ) профильного утопленного типа. Представляет собою двухрамочный прибор, работающий в схеме неуравновешенного моста Уитстона.

Для присоединения проводов прибор имеет четыре вывода. Логометр может быть присоединен к одному или нескольким термометрам сопротивления, причем для присоединения батареи и переключателя предусмотрена эбонитовая панель, на которой смонтированы эталонная катушка (закорачиваемая во время работы схемы) и подгоночные катушки.

На шкале прибора нанесены толстая красная черта в начале шкалы и тонкая красная черта с отметкой K, служащая для подгонки сопротивления проводов.

б) Регистрирующий логометр (СЛМ), имеющий ту же электрическую схему и магнитную систему, как указывающий логометр, изготовляется для записи одной, трех и шести кривых.

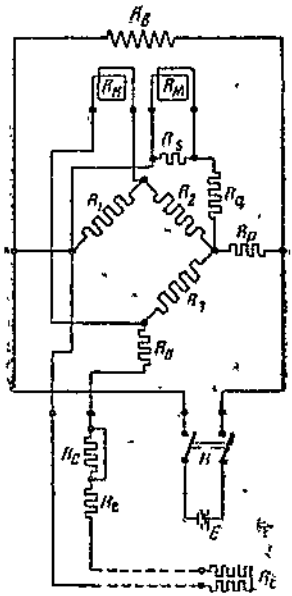


Рис. 189. Схема включения логометра в неравновесный мостик:

R_t — сопротивление термометра; R_h — сопротивление рамки постоянного зазора; R_m — сопротивление рамки переменного зазора; R_r — подгоночное сопротивление; R_e — эталонное сопротивление; R_b — сопротивление рамки возвратителя; R_1 R_2, и R_3 — сопротивление ветвей моста; R_5 — шунтирующее сопротивление; R_0, R_p, R_q — регулировочные сопротивления; B — аккумулятор; K — выключатель.

38. Проводка, переключение и питание током

Так как сопротивление соединительных проводов суммируется с сопротивлением термометра, непосредственно влияя на показания приборов, вопрос об устройстве проводки приобретает весьма серьезное значение.

При прокладке проводов необходимо соблюдать, в отношении изоляции, предписания для проводки сильных токов. Для уменьшения переходных сопротивлений необходимо, где только можно, применять пайку контактов. В сырых помещениях для проводки применять освинцованный кабель. Многожильные кабели должны быть проверены на качество изоляции жил одной от другой. Соединения многожильных и парных кабелей следует выполнять на особых панелях, допускающих отсоединение и проверку отдельных частей сети.

Кроме тщательного монтажа при устройстве сети необходим особый расчет ее, так как медь проводов обладает высоким температурным коэфициентом.

В простейшем случае, когда провода не испытывают заметных изменений температуры и их сопротивление может считаться постоянным, влияние различной длины проводов устраняется уравнительными катушками.

Градуировку термометров производят вместе с последовательно включенной катушкой сопротивлением 5—10 ом. Таким образом, сопротивление R_t состоит из сопротивления самого термометра и сопротивления катушки. При монтаже с уравнительной катушки сматывают часть сопротивления, равное сопротивлению присоединенных проводов; в результате этого сопротивление цепи, состоящей из термометра, соединительных проводов и остатка уравнительной катушки, должно остаться неизменным, равным градуировочному сопротивлению.

Например, термометры снабжены уравнительными катушками по 10 ом. При установке термометров оказалось, что сопротивления соединительных проводов пяти термометров соответственно равны: 2,3; 4,5; 6,0; 1,8 и 0,1 ома, тогда с катушек термометров должна быть смотана часть сопротивления, так чтобы после отмотки сопротивления катушек соответственно равнялись: 7,7; 5,5; 8,2; 4,0; 8,2 и 9,9 ома.

Подгонку уравнительных катушек лучше всего делать экспериментально, пользуясь эталонным сопротивлением, равным сопротивлению термометра при определенной температуре. На рис. 190 изображена схема включения пяти термометров в неравновесный мост Уитстона.

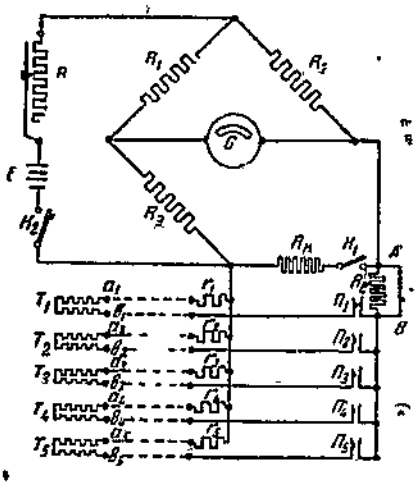


Рис. 190. Схема включения пяти термометров в неравновесный мост Уитстона:

T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 — термометры сопротивления; R_1, R_2 и R_3 — сопротивления ветвей моста; r_1, r_2, r_3, r_4 и r_5 — уравнительные катушки; $П_1$, $П_2$, $П_3$, $П_4$ и $П_5$ — включатели термометров; R_k — контрольное сопротивление для проверки э. д. с. аккумулятора; R_e — эталонное сопротивление для подгонки уравнительных катушек; K_1 — выключатель контрольного сопротивления; K_2 — выключатель источника питания; R — реостат источника питания; E — аккумуляторы; G — гальванометр.

При подгонке уравнительных катушек в общий провод термометров включается эталонное сопротивление R_e, перемычка AB снимается. Термометры закорачиваются в головках между клеммами a_1b_1, a_2b_2 и т. д. Тогда при замыкании включателей $П_1$, $П_2$ и т. д. в цепь каждого термометра будут введены соединительные провода, эталонное сопротивление и уравнительная катушка. Эталонное сопротивление равно сопротивлению термометра при определенной температуре, указанной на самом эталонном сопротивлении. Отматывая часть сопротивления уравнительной катушки, добиваются, чтобы гальванометр показал температуру, указанную на эталонном сопротивлении.

После подгонки всех уравнительных катушек снимают закорачивающие перемычки в головках термометров, а эталонное сопротивление закорачивается перемычкой AB.

Вместо эталонного сопротивления может быть использован магазин сопротивлений, на котором нужно набрать по градуировочной таблице сопротивления, соответствующие температуре примерно середины шкалы гальванометра.

Уравнительные катушки обеспечивают точность работы установки при неизменном сопротивлении сети. В действительности сопротивление сети изменяется от колебаний температуры среды, окружающей соединительные провода. Погрешность от колебаний температуры соединительных проводов может достичь значительных размеров.

В первом приближении можно для медных проводов считать, что изменение сопротивления проводов от колебаний температуры составляет:

$$\Delta r = 0{,}1\ r_0,$$

где Δr — изменение сопротивления провода;

r_0 — сопротивление провода при 0°.

Погрешность от изменения сопротивлений проводов, выраженная в градусах температуры, подсчитывается по формуле:

$$\Delta t = \frac{r_0 \frac{t_2 - t_1}{462}}{\alpha R_t} \text{ °C}, \qquad (195)$$

где Δt — величина погрешности в °С;

r_0 — сопротивление проводника в омах;

t_2 и t_1 — предельные значения колебания температуры проводов в °С;

αR_t — прирост сопротивления термометра при повышении температуры на 1° в омах.

Если величина погрешности превосходит допустимую величину и снизить ее невозможно ни уменьшением r_0, ни увеличением αR_t, приходится прибегать к трехпроводной системе проводки.

Трехпроводная система. Система эта, предложенная Сименсом, служит для уменьшения влияния соединительных проводов на результаты измерения.

Трехпроводная система состоит в том, что вершина моста, к которой присоединен гальванометр, переносится к головке термометра, как это показано на рис. 191 и 192. При этом сопротивление одного провода r_0 прибавляется к сопротивлению термометра R_t, а второго провода к сопротивлению r_3.

Уравнение равновесия моста принимает следующий вид:

$$R_t + r'_0 = (r_3 + r'_0)\frac{r_2}{r_1}. \qquad (196)$$

При изменении сопротивления проводов оно примет вид:

$$R_t + r'_0 = (r_3 + r'_0)\frac{r_2}{r_1}. \qquad (197)$$

В случае симметричного моста, когда $r_2 = r_1$, получим: $R_t + r_0 = r_3 + r_0$, т. е. изменение сопротивлений соединительных проводов не окажет влияния на результаты измерения.

Для неравновесного моста и омметра полной компенсации не будет, так как в неравновесном мосте знаменатель правой части уравнения зависит и от r_3 и от R_t. Для омметра, где один провод суммируется с R_t, а другой с R, полная компенсация неосуществима, так как:

$$\frac{R_t + G_1 \pm \Delta r}{R + G_2 \pm \Delta r} \neq \frac{R_t + G_1}{R + G_2}. \qquad (198)$$

Трехпроводная система увеличивает расход материала на установку и может быть оправдана при требовании высокой точ-

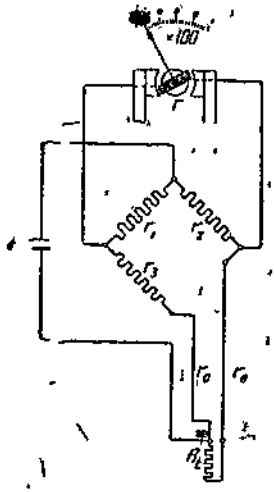


Рис. 191. Схема трехпроводного включения в неравновесный мост:

r_1, r_2, r_3 — сопротивления мостика; r_0 — сопротивления соединительных проводов; R_t — сопротивление термометра; Γ — гальванометр; E — источник питания.

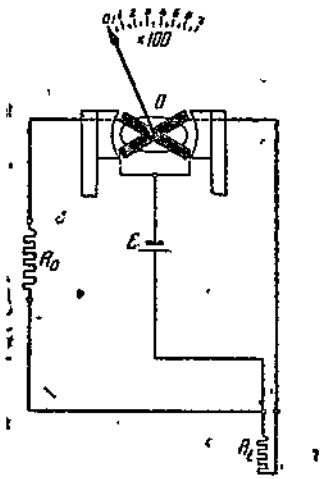


Рис. 192. Схема трехпроводного включения в омметр:

R_t — сопротивление термометра; R_0 — постоянное сопротивление; O — омметр; E — источник питания.

ности измерений и сильных колебаниях температуры пространства, по которому проходят соединительные провода.

Системы переключателей. Переключатели в установках термометров сопротивления играют столь же важную роль, как соединительные провода. От переключателя требуется надежный контакт с минимальным переходным сопротивлением.

На практике применяются переключатели трех типов: пластинчато-пружинные, щеточные и рычажные типа рубильника.

Наиболее надежный контакт дают переключатели рычажные врубающегося типа вследствие постоянного обновления контактной поверхности. На рис. 193 представлен рычажный врубающийся переключатель на пять точек. На доске *1* из изолирующего материала (эбонит, бакелит) укреплены по окружности десять пружинящих пластинок *2*, перекрывающих контактные головки *3*. В центре доски смонтирована ось *4*, несущая рычаг *5*, на концах

которого закреплены ножи *6*, входящие при повороте оси в щели между контактными головками *3* и пружинными накладками *2*, осуществляя соединение двух противолежащих контактов.

Щеточный двухполюсный переключатель на пять точек представлен на рис. 194. На доске *1* из изолирующего материала укреплены две дугообразные металлические пластины *2* и контакты *3*. Соединение между пластинами *2* и контактами *3* производится скользящими по ним щетками, закрепленными к плоским пружинам *4* и *4*. Пружины *4* и *4* укреплены на головке *5* и изолированы одна от другой. Поворотом головки осуществляется переключение линий.

Щеточный переключатель работает хорошо, если щетки изготовлены из материала

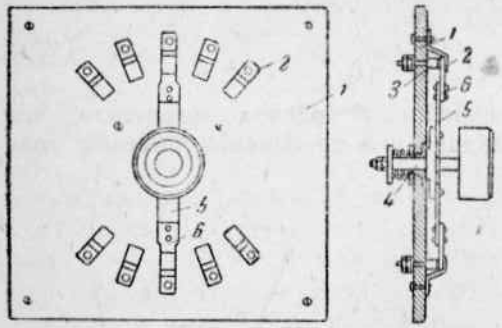


Рис. 193. Рычажный переключатель:

1 — основная доска; *2* — пружинящие пластинки; *3* — контактные головки; *4* — ось переключателя; *5* — рычаг; *6* — контактные ножи.

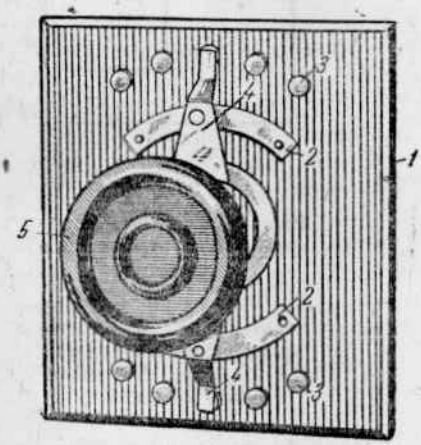


Рис. 194. Щеточный переключатель:

1 — основная доска; *2* — контактные пластины; *3* — контакты; *4* — щеточные пружины; *5* — головка переключателя.

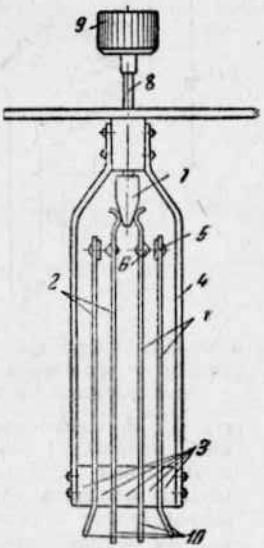


Рис. 195. Пружинно-пластинчатый выключатель (джек):

1, *2* — контактные пружины; *3* — изолирующие прокладки; *4* — рамка; *5* и *6* — контакты; *7* — клин; *8* — стержень клина; *9* — кнопка.

с высоким пределом упругости, имеют достаточную стрелу прогиба и обеспечивают давление на контактную поверхность порядка 2 *кг*.

Рычажные и щеточные переключатели при всех достоинствах отличаются громоздкостью и поэтому вытесняются переключателями пружинно-пластинчатого типа. Последние выполняются кнопочными, рычажными и поворотными.

Пружинно-пластинчатый двухполюсный выключатель (джек) (рис 195) состоит из двух пар плоских пружин *1*, *2*, изолированных

друг от друга не проводящими тока прокладками *3*. Пружины *1*, *2* собраны в металлической рамке *4*. На концах пружин приклепаны серебряные контактные площадки *5* и острия *6*. Между обеими парами пластинок входит клин *7* из изолирующего материала, сидящий на стержне *8* с кнопкой *9* на конце. При нажиме на кнопку *9* клин раздвигает пружины, острия *6* прижимаются к контактным площадкам *5*, замыкая линию тока. Хороший контакт обеспечивается тем, что при изгибе пластинок происходит не только нажим острия на площадку, но и взаимное скольжение их, обновляющее контактные поверхности. Провода линии припаиваются к хвостам пружинок *10*. Джеки кнопочного типа собираются на общей доске по числу линий переключения.

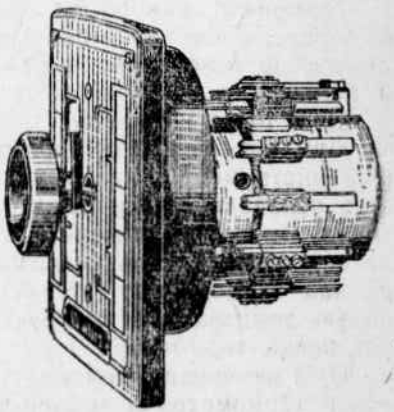


Рис. 196. Поворотный джековый переключатель на 10 точек.

Значительно удобнее и компактней поворотный переключатель на десять точек (рис. 196), выполняющий последовательное включение джеков кулачковым диском, сидящим на оси рукоятки переключателя. Переключатель имеет добавочный джек, выключающий ток при переключении термометров.

Включение термометров в схему может производиться и однополюсными и двухполюсными переключателями. Однополюсные переключатели предпочтительнее из соображений экономии проводов, однако однополюсное включение требует безукоризненного монтажа сети и совершенно надежной изоляции термометров и всех токоведущих частей. Поэтому в тяжелых условиях работы, когда есть возможность повреждения изоляции и заземления или коротких замыканий в цепи, следует применить двухполюсную систему включения.

В установке должно быть предусмотрено приспособление, исключающее возможность включения тока при выключенном термометре. Наиболее целесообразно объединить обе эти функции в одном переключателе, так чтобы раньше включался термометр, а затем источник питания.

Включение тока при выключенном термометре или при коротком замыкании в цепи термометра чрезвычайно опасно для измерительных приборов, получающих при этом недопустимые по величине толчки.

Направление удара подвижной системы измерительного прибора указывает на характер неисправности. При выключенном термометре или обрыве в сети при включении тока стрелка прибора резко отбрасывается вправо. При коротком замыкании или шунтировке термометра заземлением сети стрелка столь же резко бьет влево (к нулю шкалы).

Источники питания. Источниками питания постоянным током установок термометров сопротивления служат аккумуляторные батареи или выпрямители переменного тока, работающие от сети.

Аккумуляторы (свинцовые или щелочные) напряжением 4 *в* должны иметь емкость не менее 15 *а-час*, чтобы смену их можно было производить не чаще одного раза в 5—7 дней. Для установки следует иметь два аккумулятора одинакового типа и емкости, из которых один находится в работе, а другой в зарядке. При наличии сети переменного тока гораздо удобнее питать термометрическую установку от выпрямителей переменного тока, обеспечивающих непрерывность работы и большее постоянство напряжения.

Для небольших установок можно применять купроксные выпрямители, изготовляющиеся двух типов: КП-1 и КП-2.

Выпрямитель КП-1 предназначен для включения в сеть напряжением 110 *в*. Выпрямитель дает выпрямленный ток напряжением 2,5 *в* при максимальной силе 1,5 *а*. Тип КП-2 — для сети напряжением 220 *в*. Выпрямленное напряжение 4,5 *в*, максимальный ток 1,5 *а*.

Выпрямители обоих типов собираются на железной плите и состоят из: 1) трансформатора переменного тока с магнитным шунтом для регулирования напряжения вторичного тока, 2) купроксного выпрямителя, собранного по схеме Герца для двухполупериодного выпрямления, и 3) регулировочной катушки сопротивления в цепи выпрямленного тока.

Для больших измерительных установок с группой регистрирующих приборов применяются более мощные ртутные или катодные выпрямители.

39. Ошибки при измерении температур и способы их устранения

Термометр, каково бы ни было его устройство, установленный в определенном пространстве для измерения температуры, является по отношению к температурному полю инородным телом и неизбежно его искажает, так как или отводит, или подводит тепло к точке измерения.

При измерении температуры твердого тела, если измерительный инструмент точно показывает температуру данного места, есть основания полагать, что эта температура все же не та, которую мы хотели измерить, т. е. не та температура, которую имела данная точка или поверхность до установки термометра. Измеренная термометром температура в этом случае представляет новую температуру, которую приняла данная точка в результате установки термометра.

При измерении температуры газового потока между температурой термометра и температурой газа может образоваться значительная разность вследствие теплообмена между инструментом и стенками трубопровода, вызванного теплопроводностью и лучеиспусканием. Эта разность температур и явится ошибкой измерения.

Указанных ошибок измерения можно было бы избежать такой системой установки термометра, при которой не было бы подвода или отвода тепла. При невозможности такой установки ошибку измерения можно уменьшить, улучшая насколько возможно теплообмен между термометром и измеряемой средой.

Теплообмен в температурном поле, возникающий от введения в это поле измерительного инструмента, определяется тремя величинами: коэфициентом теплопроводности, коэфициентом теплопередачи и коэфициентом лучеиспускания.

Наиболее важными случаями в практике будут определение температуры поверхности твердого тела и определение температуры газа, протекающего по трубопроводу с более холодными стенками.

1) Измерение температуры поверхности твердого тела применяется при определении теплопотерь через стенки. Контакт с поверхностью измерительного инструмента изменяет условия теплообмена стенки с окружающей средой и тем самым вносит определенное искажение в температурное поле поверхности.

Исследования показали, что изменение вида поверхности или ее покрытие изменяет температуру поверхности изолирующего материала значительно сильнее, чем температуру металлической поверхности. При этом величина частного коэфициента теплопередачи на другой стороне стенки практически не оказывает влияния.

Для измерений температуры поверхности измерительный инструмент должен иметь воспринимающую часть такой формы, которая допускала бы тесное соприкосновение с поверхностью и не подвергалась бы влиянию температуры окружающего газа. Далее, весьма важным условием является требование, чтобы измерительный инструмент не вызывал никакого изменения температуры в месте измерения и не изменял условий теплообмена между поверхностью и окружающей средой. Наилучшим инструментом для названной цели является поверхностная ленточная термопара.

2) Измерение температуры газа, протекающего по трубопроводу, представляет наиболее сложный случай. Измерительный инструмент, помещенный в потоке газа в трубопроводе, участвует в сложном процессе теплообмена. Трубка термометра получает тепло от горячего газового потока и передает его стенке трубы частью лучеиспусканием, частью теплопроводностью. Отвод тепла от трубки термометра вызывает ошибку измерения.

Ошибка измерения, вызываемая потерями тепла от лучеиспускания, выражается следующим образом:

$$t_г - t_т = \frac{C}{\alpha}\left[\left(\frac{T_т}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_c}{100}\right)^4\right], \qquad (199)$$

где $t_г$ — температура газа;
$t_т$ и $T_т$ — температура, отсчитанная по термометру;
C — коэфициент лучеиспускания термометра;
α — коэфициент теплопередачи от газа к термометру;
T_c — температура стенки трубы.

Из этого уравнения вытекают способы уменьшения ошибки измерения, зависящей от лучеиспускания.

Ошибка измерения уменьшается с уменьшением C, поэтому трубка измерительного инструмента должна иметь полированную поверхность.

Ошибка уменьшается с увеличением α. Коэфициент теплопередачи повышается с увеличением скорости газа и уменьшением диаметра трубки измерительного прибора. Так как скорость газа в большинстве случаев не может быть изменена, то уменьшить ошибку можно уменьшением диаметра трубки термометра.

Наконец, величина ошибки зависит от разности температур термометра и стенки трубопровода; поэтому уменьшение ошибки достигается изоляцией трубопровода на участке, где установлен термометр. Дальнейшее уменьшение ошибки от разности температур термометра и стенки трубопровода можно получить установкой так называемого защитного приспособления в виде цилиндрического экрана, окружающего трубку термометра. Экран полезно снаружи покрыть изолирующим слоем.

Ошибки от лучеиспускания могут достигать очень больших величин. Так, в железном неизолированном трубопроводе диаметром 50 *мм*, по которому течет воздух с температурой 200° при температуре окружающего воздуха 20°, ошибка измерения при скорости воздуха в трубопроводе 5 *м/сек* достигает 25°. Изоляцией трубопровода в месте установки термометра ошибка уменьшает-

ся до 8°; установка защитного экрана диаметром 20 *мм* при неизолированном трубопроводе снижает ошибку до 0,7°, а в изолированном трубопроводе до 0,3°.

Второй важной причиной ошибок будет утечка тепла через стенки и арматуру термометра. Величина ошибки определяется уравнением:

$$t_г - t_т = \frac{t_г - t_0}{\cosh Al}, \qquad (200)$$

где $t_г$ — температура газа;

$t_т$ — температура, отсчитанная по термометру;

t_0 — температура стенки, в которой закреплен верхний конец термометрической трубки;

cosh — гиперболический косинус;

$$A = \sqrt{\frac{\alpha \pi d}{\lambda q}}$$

α — коэфициент теплопередачи от газа трубке термометра;

d — диаметр трубки термометра;

λ — коэфициент теплопроводности металла трубки;

q — поперечное сечение трубки термометра;

l — длина погруженной части термометрической трубки.

Отсюда для уменьшения ошибки измерения необходимо:

1) уменьшить величину разности температур путем тщательной изоляции трубопровода на участке установки термометра;

2) возможно больше увеличить длину погруженной в газ термометрической трубки;

3) повысить величину A, что можно осуществить увеличением коэфициента теплопередачи α, увеличением отношения $\frac{d}{q}$, т. е. уменьшением толщины стенок термометрической трубки, и уменьшением коэфициента теплопроводности λ.

Величины ошибок и в этом случае могут быть значительны.

Например, в железный трубопровод диаметром 60 *мм*, в котором течет газ, нагретый до 200°, вставлена перпендикулярно оси трубы термометрическая трубка диаметром 12 *мм* с толщиной стенок 1,5 *мм*. Глубина погружения 50 *мм*. Тогда при скорости воздуха 5 *м/сек* и неизолированном трубопроводе ошибка измерения будет равна 47°, т. е. 23,5% измеряемой величины.

При хорошо изолированном трубопроводе и прочих равных условиях ошибка измерения снизится до 13°, оставаясь все же недопустимо большой. Для уменьшения ошибки до 1° глубину погружения в случае неизолированной трубы следовало бы взять в 35 *см*, а при изолированной 25 *см*.

Если термометрическая трубка, как это чаще всего бывает, выступает над поверхностью стенки трубопровода, то потеря тепла термометрической трубкой в окружающую среду, естественно, увеличивается. Уменьшить ошибку, происходящую от выступающих частей, можно тщательной изоляцией трубопровода и выступающих частей термометрической трубки, а также введением разделяющих деталей, выполненных из материала с низким коэфициентом теплопроводности.

При измерении температуры жидкостей условия значительно благоприятнее, так как отпадает лучеиспускание, а коэфициент теплопередачи к термометрической трубке весьма высок. Однако

и в этом случае необходимо принимать меры предосторожности для уменьшения влияния утечек тепла.

Таким образом, при установке термометров необходимо придерживаться следующих правил:

1) Термометрическую трубку надо располагать по оси потока против его направления, как это показано на рис. 197. Радиальное расположение термометрической трубки допустимо лишь в том случае, если возможно ее погружение на достаточную глубину, т. е. в газо-

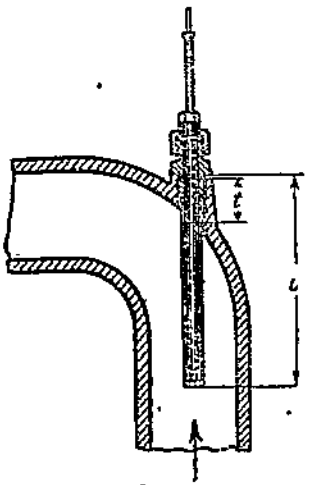


Рис. 197. Установка термометра на газо- или паропроводе.

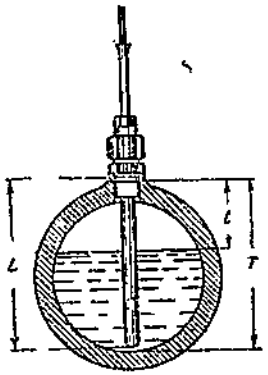


Рис. 198. Установка термометра на трубопроводе жидкости.

проводах большого диаметра, или если измеряется температура жидкости (рис. 198). При невозможности осевого ввода против

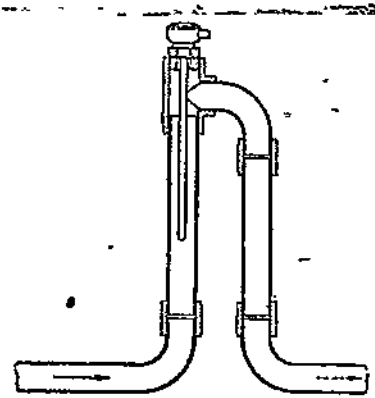


Рис. 199. Изгиб трубопровода для установки термометра.

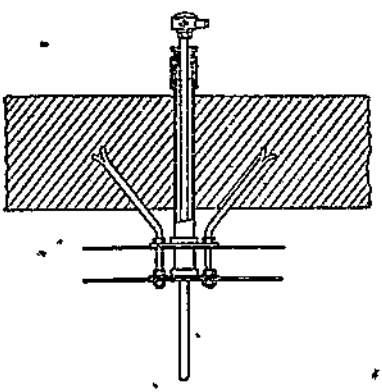


Рис. 200. Обогрев трубки термометра дисками.

потока на трубопроводе следует устроить изгиб П-образной формы, как показано на рис. 199, и ввести в него термометр.

2) Термометрическая трубка не должна выступать из газопровода, толщина стенок ее должна быть как можно меньше, глубина погружения возможно больше, материал трубки должен иметь возможно меньшую теплопроводность. Поэтому термометрические трубки предпочтительно делать из нейзильбера, железа, никеля, фарфора, кварца.

3) Тщательной теплоизоляцией участка трубопровода, на котором установлен термометр, нужно добиваться, чтобы температура стенок трубопровода была как можно ближе к температуре газа.

4) В газоходах, стенки которых выполнены из плохих проводников тепла (кирпичные борова и т. п.), следует применить искусственное нагревание места ввода термометра. Это приспособление состоит из заделанной в кладку металлической трубы с одним или несколькими металлическими дисками на конце (рис. 200). В этой трубе укрепляется термометрическая трубка. Это приспособление одновременно уменьшает потерю через лучеиспускание.

ГЛАВА IX

ПИРОМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

40. Измерение интенсивности излучения

С помощью пирометров излучения производится измерение лучистой энергии, выделяемой нагретым телом.

Лучистая энергия выделяется нагретым телом в виде волн различной длины. При сравнительно низких температурах (до 500°) нагретое тело испускает инфракрасные волны большой длины, не воспринимаемые человеческим глазом. По мере повышения температуры к инфракрасному излучению присоединяются видимые световые волны все меньшей и меньшей длины. Цвет раскаленного тела от темнокрасного через светлокрасный, оранжевый и желтый доходит до белого, содержащего волны всех длин, воспринимаемых глазом.

Изменение цвета раскаленного тела с повышением температуры послужило основанием для составления эмпирических температурных шкал, позволяющих опытному наблюдателю приближенно определять температурные интервалы по цвету.

Однако определение температуры по цвету раскаленного тела представляется весьма субъективным, о чем свидетельствует, между прочим, существование нескольких цветовых шкал с разными градациями цветов. Более надежным путем определения температур по лучеиспусканию является измерение яркости (интенсивности излучения), возрастающей чрезвычайно сильно с повышением температуры.

Наибольшей лучеиспускательной способностью, принимаемой за единицу, обладает абсолютно черное тело, представляющее собой физическую фикцию, так как все реальные физические тела имеют коэфициент лучеиспускания меньше единицы.

Для реального воспроизведения абсолютно черного тела Кирхгофом предложено использование замкнутой полости с непрозрачными и равномерно нагретыми стенками с малым отверстием в одной из стенок. Поверхность этого отверстия обладает лучеиспускательными свойствами абсолютно черного тела.

Возрастание интенсивности излучения с ростом температуры различна для различных длин волн и выражается уравнением Вина:

$$I_\lambda = C_1 \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \qquad (201)$$

где I' — интенсивность излучения для волны длиной λ;
T — абсолютная температура абсолютно черного тела;
e — основание натуральных логарифмов;
C_1 и C_2 — постоянные.

Значение постоянной $C_1 = 37{,}4 \cdot 10^{-6}$ *эрг см*^{2} *сек*$^{-1}$ несущественно для измерения температуры оптическим методом. Наоборот, постоянная $C_2 = 1{,}432$ *см* 1° чрезвычайно важна для построения температурной шкалы выше точки плавления золота.

Поскольку интенсивность излучения не одинакова для различных волн, измерения ведутся для волны определенной длины — обычно для красного света с длиной волны 0,65 μ.

Уравнение Вина позволяет определить численные значения возрастания излучения с ростом температуры.

Напишем уравнение Вина для каких-либо двух температур T_1 и T_2, обозначив излучение при температуре T_1 через I'_λ, а при температуре T_2 через I''_λ:

$$\left.\begin{aligned} I'_\lambda &= C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_1}} \\ I''_\lambda &= C_1 \lambda^{-5} e^{-\frac{C_2}{\lambda T_2}} \end{aligned}\right\} \qquad (202)$$

Далее, возьмем отношение этих интенсивностей и его прологарифмируем:

$$\lg \frac{I'_\lambda}{I''_\lambda} = \frac{C_2}{\lambda} \lg e \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right). \qquad (203)$$

Подставив в уравнение (203) вместо C_2, $\lg e$ и λ их численные значения, получим:

$$\lg \frac{I'_{0{,}65\,\mu}}{I''_{0{,}65\,\mu}} = 9568 \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right). \qquad (204)$$

Чтобы дать понятие о стремительности возрастания интенсивности излучения с ростом температуры, примем интенсивность излучения при 1000° К за единицу и вычислим по уравнению (204) интенсивности излучения для 1200, 1400, 1600, 1800 и 2000° К.

В результате вычислений будем иметь следующий ряд чисел:

Температура в °К	1000	1200	1400	1600	1800	2000
Интенсивность излучения в условных единицах . . .	1	39	537	3800	17400	60200

Из полученного ряда чисел вытекает, что интенсивность излучения растет пропорционально возрастанию абсолютной температуры тела, возведенному в 15—20-ю степень. Это обстоятельство чрезвычайно благоприятно для оптического метода измерения температур, так как даже значительные ошибки фотометрирования будут мало отражаться на точности измерения.

Полная мощность излучения абсолютно черного тела определяется уравнением Стефана-Больцмана, по которому 1 $м^2$ абсо-

лютно черного тела, замкнутого в пространстве с абсолютно черными стенками, лучеиспускает энергию:

$$E = C_c (T_п^4 - T_с^4) \text{ кал/час}, \quad (205)$$

где C_c — постоянная;
$T_п$ — абсолютная температура излучающей поверхности;
$T_с$ — абсолютная температура окружающих стенок.

Физические тела излучают менее интенсивно, чем абсолютно черное тело, поэтому если судить о температуре физического тела по его излучению, сравнивая с излучением абсолютно черного тела, то оценка температуры окажется не соответствующей истинной температуре. Поэтому, измеряя оптическим методом температуру физического тела, получаем в результате некоторую кажущуюся температуру. Полученная кажущаяся температура связана определенным соотношением с истинной температурой, так что последняя может быть вычислена по величине кажущейся температуры. Соотношение между кажущейся и истинной температурами зависит от метода измерения, т. е. от того, какое свойство излучения положено в основу измерения.

В настоящее время пирометры излучения используют один из двух методов измерения излучения:

1) измерение интенсивности излучения лучей определенной длины волны (монохроматического света) фотометрическим путем;

2) измерение полной мощности излучения раскаленного тела.

Соответственно этим двум методам измерения пирометры излучения делятся на оптические и радиационные.

Кажущаяся температура физического тела будет различна при измерении одним и другим методом, но от любой из этих двух кажущихся температур можно перейти к истинной температуре тела.

При измерении температуры физического тела оптическим пирометром переход от кажущейся температуры к истинной производится при помощи соотношения:

$$T = \frac{1}{\frac{1}{T_к} - \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{e_\lambda}}, \quad (206)$$

где T — истинная температура тела в °К;
$T_к$ — кажущаяся температура тела в °К, измеренная оптическим пирометром;
λ — длина волны в μ;
C_2 — постоянная уравнения Вина;
e_λ — коэфициент лучеиспускания данного тела для данной длины волны.

Кажущаяся температура, измеренная радиационным пирометром, пересчитывается в истинную по соотношению

$$T = T_к \sqrt[4]{\frac{1}{e}}, \quad (207)$$

где ε — коэфициент излучения во всех лучах для данного тела;

T и $T_к$ — температуры истинная и кажущаяся, измеренные радиационным пирометром.

Пространство печи, наблюдаемое через малое отверстие в стенке, или внутренность шамотной трубы с глухим дном, заделанной в стенку печи, так что ее закрытый конец находится в печном пространстве, весьма приближается по свойствам к абсолютно черному телу и измерение температур оптическими пирометрами дает истинные температуры.

41. Оптические пирометры

Чрезвычайно быстрый рост интенсивности излучения с повышением температуры позволяет применять для оптического измерения температур относительно простые и грубые фотометры. Измерение интенсивности излучения производится сравнением двух освещенных полей, из которых одно освещено раскаленным телом, а другое регулируемым источником света. Оптические пирометры градуируются по абсолютно черному телу и на шкалы наносятся значения температур абсолютно черного тела.

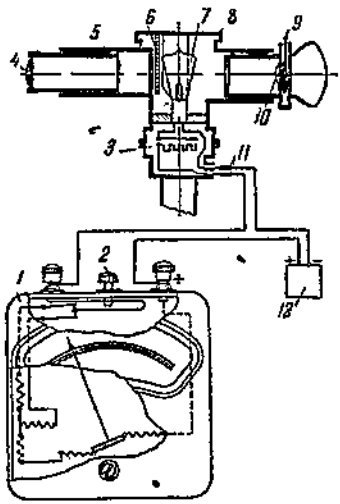


Рис. 201. Оптический пирометр Гольборна-Курльбаума:

1 — миллиамперметр; *2* — кнопка выключателя; *3* — реостат лампочки; *4* — объективная линза; *5* — трубка пирометра; *6* — нейтральный (серый) светофильтр; *7* — лампочка накаливания; *8* — крышка; *9* — красный светофильтр; *10* — окулярная линза; *11* — контакты для включения соединительных проводов; *12* — аккумулятор.

Пирометр Гольборна-Курльбаума. Наиболее распространенным прибором этой группы является пирометр Гольборна-Курльбаума или пирометр с исчезающей нитью.

Пирометр с исчезающей нитью действует по методу сравнения яркостей тела, температуру которого измеряют, и нити лампочки накаливания, силу тока которой можно регулировать.

Пирометр Гольборна-Курльбаума (рис. 201) состоит из трубы *5* с двумя линзами: объективной *4* и окулярной *10*. Внутри трубы, в фокусе объективной линзы помещена лампочка накаливания *7* с П-образной нитью — угольной или вольфрамовой. Лампочка питается от 2- или 4-вольтового аккумулятора *12* через реостат *3*, вмонтированный в цилиндрический отросток зрительной трубы. Движок реостата укреплен на рифленом кольце, охватывающем патрубок. Вращением этого кольца от руки регулируется сила тока, питающего лампочку, а следовательно, степень накала нити.

Для получения монохроматического света в окулярной трубке имеется красный светофильтр, вделанный в диск *9*, вращением которого можно либо ввести светофильтр, либо его убрать из поля зрения.

Оптическая система прибора позволяет производить измерения температуры на расстоянии 0,5—5 *м*.

Объектив и окуляр прибора закреплены в тубусах, скользящих в трубе *5*, для установки действительного изображения раскаленного тела в плоскости нити и для получения резкого изображения нити.

Сила тока измеряется миллиамперметром *1*.

Измерение температуры пирометром с исчезающей нитью производится следующим порядком. Соединив оптическую трубу с миллиамперметром при полностью введенном реостате и разомкнутой цепи лампы, отводят красный светофильтр и, направив трубу на какую-либо светлую поверхность, передвигают окуляр до получения наиболее резкого изображения нити. Включив красный светофильтр, направляют трубу на тело или пространство, подлежащее измерению, и передвигают объектив до получения четкого и резкого изображения тела (перевернутого); нить лампочки в виде резкой черной подковки проектируется на освещенное поле. Этим заканчивается подготовка оптической системы к измерению.

Включив аккумулятор, начинают выводить реостат вращением кольца до тех пор, пока средняя часть волоска не сольется с освещенным телом. По шкале амперметра в этот момент отсчитывают температуру тела.

Так как нить лампочки не следует нагревать выше 1400—1500° К во избежание быстрого нарушения градуировки, пределы измерения пирометра повышают введением серого (нейтрального) светофильтра *6*. Нейтральный светофильтр укреплен к крышке *8*, вращением которой может быть либо поставлен между объективной линзой и лампой, либо отведен в сторону. Нейтральный светофильтр ослабляет яркость изображения в несколько десятков раз, яркость же нити лампочки остается неизменной.

Шкала амперметра делается двойной, причем верхняя шкала имеет деления от 700 до 1400°, а нижняя (с нейтральным светофильтром) от 1300 до 2000°.

Погрешность прибора при измерении температуры тела, приближающегося по свойствам к абсолютно черному телу, не больше $\pm$ 1,5% от максимального значения шкалы.

Погрешности оптических пирометров и поправки. В показания оптических пирометров нет надобности вводить поправки при измерении температуры топочного пространства через малое отверстие или температуры полости раскаленной трубы с глухим концом, вделанной в топочное пространство, так как в этих случаях свойства излучателя весьма близки к свойствам абсолютно черного тела.

При измерении температуры раскаленных поверхностей твердых тел или поверхности жидкого металла необходимо вводить

поправку, так как пирометр в этом случае покажет кажущуюся температуру тела.

Поправка может быть вычислена или по уравнению (206) на основании коэфициента излучения (табл. 14) в монохроматическом свете с длиной волны 0,65 μ, или по кривым поправок, приведенным на рис. 202.

Таблица 14

Коэфициенты излучения различных веществ

Вещество	$\varepsilon_{0,65\,\mu}$	Вещество	$\varepsilon_{0,65\,\mu}$
Серебро	0,07	Нихром окисленный	0,8—0,9
Медь твердая неокисленная	0,11	Жидкий чугун окисленный	0,9—0,95
Медь жидкая неокисленная	0,15	Жидкий чугун неокисленный	0,4
Золото твердое	0,13	Жидкие шлаки	0,9—1,0
Золото жидкое	0,22	Свинцовая ванна, шлаки	1,0
Платина твердая	0,33	Свинцовая ванна, чистое зеркало	0,5—0,6
Никель твердый и жидкий неокисленный	0,36	Соляная ванна	0,8
Железо твердое неокисленное	0,45	Графит в порошке	0,95
		Уголь	0,85
Железо жидкое неокисленное	0,40	Окись алюминия прессованная	0,14
Железо твердое окисленное	0,92—0,98	Окись хрома прессованная	0,85
Спец. сталь твердая окисленная	0,8	Фарфор	0,25—0,50
Никель окисленный	0,85—0,96	Шамот	0,7—0,8
Медь окисленная	0,7	Карборунд	0,8

Поправка определяется по диаграмме следующим образом. На оси абсцисс находится температура, указанная пирометром; проводится ордината до встречи с кривой, соответствующей коэфициенту излучения данного тела; от точки пересечения проводится горизонталь до встречи с осью ординат, где находится величина поправки, которую необходимо прибавить к температуре, показанной пирометром.

Оптические пирометры дают возможность измерять температуру небольших объектов. Измерение производится быстро с точностью, достаточной для технических измерений; прибор компактен и удобен, особенно в конструктивной модификации типа «Пиропто», в котором аккумуляторы (щелочные) помещены в рукоятке прибора, а миллиамперметр укреплен на оптической трубе.

Недостатки оптических пирометров заключаются в необходимости отдельного источника тока, субъективности измерений и невозможности использовать прибор для автоматического измерения и регулирования [1].

42. Радиационные пирометры

Пирометры полного излучения, или радиационные, измеряют температуру по тепловому действию лучистой энергии раскаленного тела. В общем виде пирометр представляет собой оптическую систему (зеркало или линзу), собирающую лучи, испускаемые телом на каком-либо воспринимающем тепло органе.

Таким органом может быть термоэлектрический элемент, батарея или биметаллическая спираль.

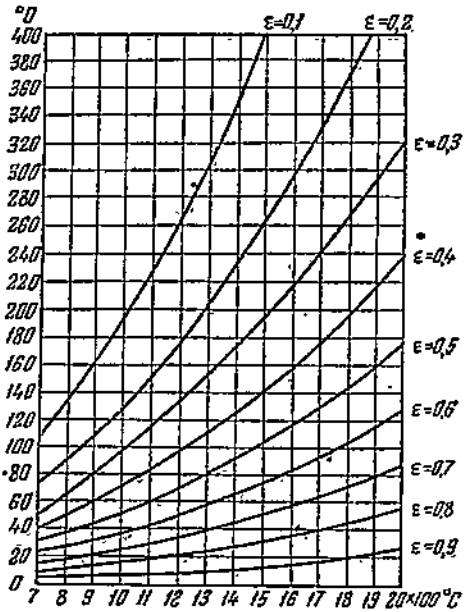


Рис. 202. Кривые поправок оптического пирометра.

Если отвлечься от различных побочных явлений, то можно считать, что количество энергии, попадающей на тепловоспринимающий орган в единицу времени, пропорционально четвертой степени абсолютной температуры тела.

Точный количественный учет поступающей в приемник лучистой энергии крайне труден, так как воспринимающий тепло орган находится в сложном теплообмене с окружающей средой и стенками телескопа; часть энергии отражается приемником и т. д. Поэтому при измерении нельзя быть уверенным, что тепловое равновесие прибора соответствует градуировочному, а следова-

[1] В настоящее время в США фирмой Броун выпущен оптический пирометр «Оптиматик», работающий вполне автоматически. Сравнение освещенности в этом приборе выполняют фотоэлементы, что дает полную объективность измерения и позволяет осуществить регистрацию показаний. Таким образом в новом приборе устранены основные наиболее существенные недостатки оптического пирометра.

тельно, прибор может давать погрешности, не поддающиеся ни учету, ни исправлению.

Ввиду этого радиационные пирометры дают невысокую точность, достаточную для технических целей, но не для точных измерений, и не могут быть использованы в качестве эталонных приборов.

Несмотря на эти недостатки радиационные пирометры получили широкое распространение в производственной практике, так как они действуют без участия наблюдателя, могут быть установлены стационарно, позволяют регистрацию показаний при помощи пишущих гальванометров и могут быть приспособлены для регулирования температуры.

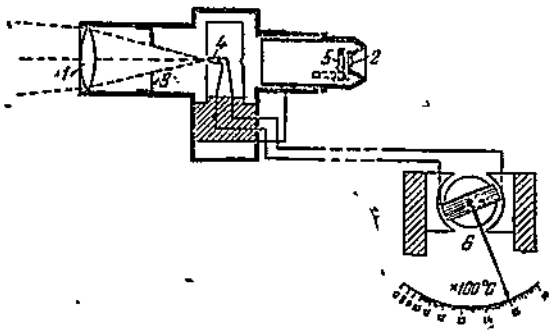


Рис. 203. Радиационный пирометр (ардометр) завода «Пирометр»:

1 — объективная линза; *2* — окулярная линза; *3* — диафрагма; *4* — термобатарея; *5* — дымчатый светофильтр; *6* — гальванометр.

Радиационный пирометр (ардометр) завода «Пирометр». Устройство радиационного пирометра с термопарой показано на рис. 203. Он состоит из телескопа с объективной линзой *1* и окулярной линзой *2*. На пути лучей объективной линзы установлена диафрагма *3*. В фокусе объективной линзы установлена термобатарея *4*, состоящая из четырех миниатюрных термоэлементов, соединенных последовательно. Горячие спаи термоэлементов смонтированы на маленькой крестообразной пластинке из платиновой фольги, покрытой платиновой чернью.

Провода термобатареи выведены к двум клеммам на корпусе телескопа. Для защиты глаз от ослепления при установке ардометра за окулярной линзой имеется дымчатый светофильтр *5*, устанавливаемый рычажком снаружи корпуса.

Ардометр присоединяется к гальванометру *6*, шкала которого градуирована в °С по абсолютно черному телу, в пределах от 700 до 1800°, но рабочими пределами шкалы является диапазон от 1000 до 1800°.

Ардометр приспособлен к стационарной установке и может быть соединен с самопишущим или контактным гальванометром или потенциометром.

При стационарной установке весьма важно защитить пирометр от нагрева корпуса телескопа, так как в этом случае резко изменяется тепловое равновесие термобатареи и показания ардометра теряют достоверность. Поэтому ардометр устанавливают в кожухе с водяным и воздушным охлаждением.

На рис. 204 показан один из вариантов установки. В стенку печи вмурована металлическая труба *1* с двойными стенками, между которыми циркулирует вода, поступающая по трубке *2* и удаляющаяся по трубке *3*. Труба *1* оканчивается кожухом *4* для укрепления ардометра. Кожух снабжен съемной крышкой *5*. В трубу *1* вдувается воздух по трубке *6*, защищающий объективную линзу ардометра от загрязнения частицами дыма и золы.

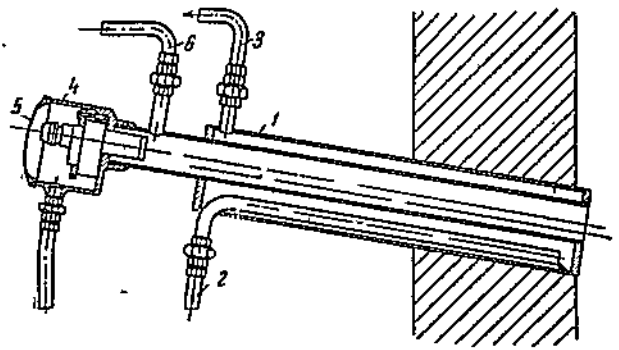


Рис. 204. Установка ардометра в охлаждаемом кожухе:

1 — труба с двойными стенками; *2* — ввод охлаждающей воды; *3* — сток воды; *4* — кожух ардометра; *5* — крышка кожуха; *6* — трубка для подачи воздуха.

Погрешности радиационных пирометров. По принципу своего устройства радиационные пирометры дают погрешности измерений, вызываемые следующими причинами.

1) Неполнота излучения измеряемого тела, т. е. неполная его чернота. В большинстве случаев погрешность от неполноты излучения не может быть учтена, так как у различных тел лучи разной длины ослабляются неодинаково, т. е. лучеиспускание нечерных тел селективно с разной формой и степенью селективности.

Неполнота и селективность излучения складываются с селективностью поглощения лучей в линзе телескопа, поэтому аналитические подсчеты поправок лишены даже умеренной точности и не могут быть использованы.

Ввиду этого ардометр следует применять для измерения температуры тел, по своим свойствам приближающихся к свойствам абсолютно черного тела.

2) Погрешности от лучепоглощения в промежуточной среде и в самом телескопе от его загрязнения также не поддаются аналитическому учету. Для ардометров со стеклянной линзой эти погрешности не велики, особенно, если линза защищена от запыления, как показано на рис. 204.

3) Влияние расстояния, теоретически не существующее, практически сказывается на показаниях ардометра. Для сохранения приемлемой точности показаний расстояние ардометра от излуча-

теля не должно превышать 1 *м*, а диаметр излучателя должен быть не менее $^1/_{20}$ расстояния между прибором и излучателем.

Влияние расстояния на показания прибора представлено на рис. 205.

4) Погрешности от нагревания телескопа зависят от свойства термопар, величина э. д. с. которых является функцией температур холодного и горячего спаев.

Показания пирометра уменьшаются с увеличением температуры самого прибора. Для ардометров с термобатареей, заключенной в колбочку, наполненную аргоном, погрешность от нагревания телескопа не превышает 1,5% от показания при нагреве прибора до 100°. Тем не менее, необходимо стремиться к снижению нагрева, так чтобы температура прибора была близка к 20°.

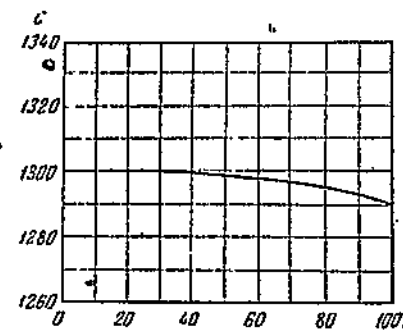


Рис. 205. Влияние расстояния на показания ардометра.

5) Погрешности электроизмерительного порядка. Главной причиной служит перегрев гальванометра в случае близкого соседства с печью или аппаратом, температура которого измеряется ардометром. Поэтому необходимо удалять гальванометр в помещение с нормальной температурой или заранее оценить температурный коэфициент гальванометра и в зависимости от него выбрать допустимый предел колебания температуры, не сильно отражающийся на показаниях. Сопротивление цепи, соединяющей ардометр с гальванометром, должно соответствовать сопротивлению при градуировке, указанному на шкале гальванометра.

При соблюдении всех этих условий погрешность ардометра не будет превышать $\pm$ 2% от наибольшего значения шкалы, в противном случае она может дойти до $\pm$ 3% и выше.

Наиболее важный фактор, определяющий меньшую точность радиационных пирометров по сравнению с оптическими, заключается в законах лучеиспускания. В то время как интенсивность видимых излучений растет пропорционально 15—20-й степени повышения абсолютной температуры, полное излучение возрастает лишь пропорционально четвертой степени повышения абсолютной температуры. Так, например, яркость для лучей длины волны 0,65 μ при повышении абсолютной температуры с 1000 до 2000° К возрастает в 60 200 раз, полное же излучение увеличивается всего в 16 раз.

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

ОПРЕДЕЛИТЕЛИ СОСТАВА И КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ

ГЛАВА X

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА И КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

43. Общие сведения

Определение состава материалов, участвующих в химико-технологических процессах, является характерной особенностью производственного контроля на химических заводах. К определению состава, главным образом, сводится контроль качества продуктов и полупродуктов производства, устанавливающий соответствие качества продукта принятым нормам и стандартам.

Основными методами определения состава и качества материалов являются методы аналитической химии, позволяющие устанавливать состав и качество материалов с исчерпывающей полнотой и высокой точностью.

Однако методы химического анализа не могут обеспечить текущий своевременный контроль производства, так как требуют для выполнения значительного времени. Результаты анализа поэтому получаются с большим или меньшим запаздыванием, что исключает возможность своевременного вмешательства для устранения отклонений от нормы.

В современных химических производствах, оперирующих с большими количествами вещества и отличающихся высокой скоростью процессов, запаздывание результатов анализа грозит весьма большими производственными потерями от брака и нарушения темпа процесса. В некоторых случаях запоздание результатов анализа может привести к тому, что не будет во-время замечено приближение или возможность аварии. Поэтому для текущего производственного контроля обычные аналитические методы за крайне редкими исключениями оказываются не пригодными и их роль ограничивается предварительным контролем сырья и материалов производства и последующим контролем результатов производственного процесса.

Текущий автоматический контроль состава и качества материалов выполняется приборами, действие которых основано на измерении физико-химических величин, характеризующих состав или качество материала.

Развитие физической химии и методов измерительной техники, введение в промышленную практику электронных приборов дает возможность в настоящее время решать весьма обширный круг задач по определению состава и качества материалов.

Возможность создания автоматических приборов для контроля состава и качества облегчается тем обстоятельством, что в промышленном контроле производства приходится определять содержание одного какого-либо компонента в исследуемом веществе, причем колебания концентрации искомой составной части не выходят за определенные достаточно узкие пределы.

44. Объекты определений

Приборы для автоматического определения состава и качества материалов весьма многочисленны и разнородны, так как они приспособлены к измерению различных физико-химических параметров и к крайне разнообразным свойствам исследуемых материалов.

Наиболее распространено определение состава и качества газовых смесей и жидкостей.

Исследование твердых тел применяется в химических производствах весьма редко.

Анализ газовых смесей сводится к определению содержания одной, максимум двух составных частей смеси, выражаемого в объемных процентах.

Жидкости анализируются либо на содержание какого-либо растворенного вещества, т. е. определяется концентрация раствора, выражаемая в весовых процентах; либо измеряется физико-химическая величина, характеризующая качество исследуемой жидкости.

Охватить в кратком курсе все многообразие приборов этого класса невозможно, тем более что эта область автоматического контроля находится в настоящее время в периоде бурного развития. Количество методов измерения и число типов измерителей состава и качества материалов увеличивается чрезвычайно быстро.

В дальнейшем рассматриваются только наиболее распространенные и важные приборы данного класса.

45. Классификация определителей состава и качества материалов

Классификация построена по общему принципу, принятому в этой книге, т. е. основное деление на группы осуществляется по признаку назначения прибора, а дальнейшее деление производится по методам измерения и по конструктивным типам.

В соответствии с этим приборы для определения состава и качества материалов делятся на следующие группы:

а) Газоанализаторы, т. е. приборы, определяющие содержание какого-либо компонента в газовой смеси. Эта группа

наиболее многочисленна и разнообразна по используемым методам анализа и по конструктивным типам.

б) Кислото- и солемеры, или определители концентрации электролитов (кислот, щелочей и солей) в растворах. К этой же группе отнесены приборы для измерения щелочности или кислотности растворов, т. е. для измерения концентрации водородных ионов (pH).

в) Плотномеры — измерители удельного веса газов и жидкостей. В курс включены лишь приборы для измерения удельного веса жидкостей.

г) Вискозиметры, или приборы для измерения вязкости жидкостей.

д) Колориметры и нефелометры, т. е. приборы, определяющие степень окраски или прозрачности жидкостей и газов.

Этими группами не исчерпывается содержание класса приборов, определяющих состав и качество материалов. Исключены из рассмотрения рефрактометры и интерферометры, являющиеся весьма ценными приборами, но не получившие еще законченного оформления в качестве автоматических приборов. Не рассматриваются приборы для определения влажности газов (психрометры) и твердых материалов, как имеющие очень ограниченное применение в химических производствах.

ГЛАВА XI

ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ

46. Общие сведения и классификация газоанализаторов

Автоматические газоанализаторы впервые были созданы для анализа дымовых газов на содержание углекислоты с целью контроля использования топлива в теплоэнергетических установках.

Со времени появления в конце прошлого века первого автоматического газоанализатора «Адос» шла напряженная работа по созданию новых более совершенных приборов, по изысканию новых методов анализа и применению газоанализаторов для анализа других газовых смесей. Последнее приобрело особенное значение с развитием промышленности газового синтеза (синтезы аммиака, метанола, других органических соединений жирного ряда), крекинг-процесса, производств промышленных и редких газов.

За последние 15—20 лет появилось много газоанализаторов разных типов для исследования промышленных газовых смесей различными методами.

Современные газоанализаторы используют не только химические методы, но и различные физические свойства отдельных компонентов газовых смесей. По этому признаку автоматические газоанализаторы удобно разделить на химические, электрические и механические.

Следует заметить, что задача промышленного газового анализа обычно состоит в определении чистоты получаемого или участвующего в производстве вполне определенного газа, т. е. в установлении количества примесей в данном газе.

Таким образом, в большинстве случаев требуется аналитическое определение количества одного какого-либо из компонентов газовой смеси. Значительно реже приходится определять содержание двух и трех компонентов.

Увеличение числа определяемых составных частей газовой смеси резко усложняет прибор, и для многих случаев многокомпонентного анализа в настоящее время не имеется автоматических газоанализаторов.

Химические газоанализаторы основаны на поглощении одной или нескольких составных частей газовой смеси каким-либо веществом, вступающим в химическое соединение с данным компонентом газовой смеси.

Работа электрических и механических (или вообще физических) газоанализаторов основана на использовании какого-либо физического свойства определяемого компонента газовой смеси,

заметно отличающегося от того же свойства остальных составных частей смеси. В качестве таких физических величин для целей газового анализа используются: плотность или удельный вес газа, теплопроводность, вязкость, диффузионная способность, величина лучепреломления и т. п. Выбранная для определения физическая величина должна обладать в данной газовой смеси аддитивным свойством, т. е. если обозначить характеризующую физическую величину каждого из компонентов газовой смеси через ε_1, ε_2, ε_3,... и т. д., а процентное содержание каждого компонента через p_1, p_2, p_3..., то величина данного физического параметра для газовой смеси должна отвечать равенству:

$$\varepsilon_{см} = \frac{p_1}{100}\varepsilon_1 + \frac{p_2}{100}\varepsilon_2 + \frac{p_3}{100}\varepsilon_3 + \ldots \qquad (208)$$

Из этого равенства вытекает, что физические методы определения, строго говоря, пригодны только для двойных смесей. Для более сложных смесей уравнение (208) становится неопределенным, ибо для определения состава газовой смеси хотя бы из трех компонентов необходимо найти значения трех неизвестных (содержания каждого из трех компонентов) из двух уравнений [уравнение (208) и уравнение: $p_1+p_2+p_3=100$].

Определение содержания искомого компонента в многокомпонентной смеси возможно лишь в том случае, если все остальные компоненты смеси обладают одинаковым значением данного физического параметра или величины этого параметра остальных компонентов настолько близки друг к другу, что принятие их равными не вызовет заметной погрешности определения.

47. Устройство химических газоанализаторов

Область применения, принципы устройства и работы. Областью применения химических газоанализаторов является исследование газовых смесей, для составных частей которых можно подыскать надежно действующие поглотители.

В частности химические газоанализаторы предназначаются для анализов:

1) Топочных и дымовых газов на содержание углекислоты и (после сжигания) суммы $CO+H_2$. Обычный объем шкалы 0—20%.

2) Газов известковообжигательных печей на содержание углекислоты и суммы $CO+H_2$. Объем шкалы 0—40%.

3) Богатых горючих газов генераторов, доменных и коксовых печей на содержание углекислоты, окиси углерода, водорода и иногда тяжелых углеводородов. Объем шкалы 0—60%.

4) Газов различных химических производств на содержание сернистого ангидрида, аммиака, хлористого водорода, хлора, кислорода, водорода. Шкалы, в зависимости от исследуемой смеси: 0—5; 0—20; 0—40; 60—100; 90—100%.

По числу определяемых компонентов химические газоанализаторы делятся на три группы: 1) симплекс для определения

одной составной части, 2) дуплекс двух и 3) триплекс трех составных частей газовых смесей.

Независимо от разнообразия конструкции все автоматические химические газоанализаторы построены по одному принципу работы.

Исследуемый газ периодически (один раз в 2—3 мин.) засасывается в строго определенном объеме (100—200 *см*³) в волюмометр тем или иным силовым устройством. Отмеренная порция газа проталкивается далее тем же силовым устройством в поглотительный сосуд или в дожигательную печь. Газ, прошедший через поглотительный сосуд, поступает в измерительное устройство колокольного или поплавкового типа, где измеряется, оставшийся после поглощения объем газа. Перемещение измеряющего элемента (колокола или поплавка) передается записывающему устройству, вычерчивающему на диаграмме штриховую или сплошную кривую изменения состава газовой смеси.

Отличительными чертами химических газоанализаторов являются: периодичность и цикличность их работы. Цикл состоит из двух ясно выраженных частей: засасывания и нагнетания газа.

Все химические газоанализаторы регистрирующие и обычно не имеют указывающей части.

Каждый химический газоанализатор состоит из силового устройства, волюмометра, анализирующего устройства, измерительного узла, пишущего приспособления и продувочного устройства.

Если прибор снабжен телепередачей, то к перечисленным узлам добавляется электропередатчик, связанный с измерительным или пишущим устройством.

По принципу работы силовой части химические газоанализаторы можно разделить на приборы с гидравлическим приводом и приборы с электромеханическим приводом. И те и другие строятся как со штриховой записью, так и с записью сплошной кривой. Привод диаграммной ленты в современных приборах осуществляется мотором Уоррена.

Дистанционные передатчики обычно омического типа на постоянном токе с логометрами в качестве вторичного прибора.

Химический газоанализатор ГУ-40/42-253. Газоанализатор ГУ-40 является газоанализатором типа «симплекс», предназначенным для определения содержания углекислоты в газовой смеси.

Газоанализатор работает по схеме, изображенной на рис. 206. Отмеренная в волюмометре *20* проба газа поступает в поглотительный сосуд *27*, непоглощенная часть газа выдавливает из сосуда *27* определенный объем жидкости в воронку *29*, поднимая находящийся в ней поплавок. Высота подъема поплавка определяет содержание углекислоты в газовой смеси.

Устройство газоанализатора схематически представлено на рис. 207. Газоанализатор состоит из гидравлического силового устройства *1—13*, волюмометра *14—21*, поглотительного сосуда *27*, измерительного устройства *29* и регистрирующего прибора *24*.

Работа газоанализатора протекает следующим образом. Вода из водопроводной сети по трубе *1*, снабженной регулирующим краном, поступает в распределительный бачок *2* с постоянным уровнем, поддерживаемым переливной трубой *5*.

Часть воды из бачка *2* поступает в эжектор *3—4*, создавая разрежение в трубке *11*, благодаря которому из трубы *14* через гидравлический затвор *12* непрерывно засасывается исследуемая газовая смесь.

Другая часть воды из бачка *2* через регулирующий кран *6* попадает в трубу *7* напорного устройства. Вода из трубы *7* поступает в сосуд *10* и, после поднятия ее уровня в сосуде до нижнего края трубы *7*, сжимает содержащийся в ней воздух, давление которого по трубке *13* передается в сосуд *21* волюмометрического узла.

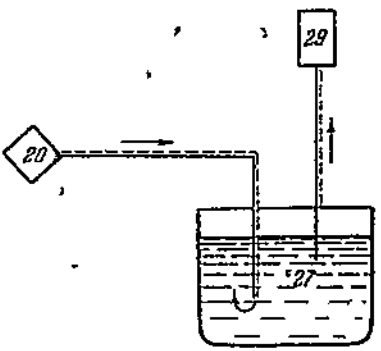


Рис. 206. Схема действия химического газоанализатора:

20 — волюмометр; *27* — поглотительный сосуд; *29* — измерительная воронка.

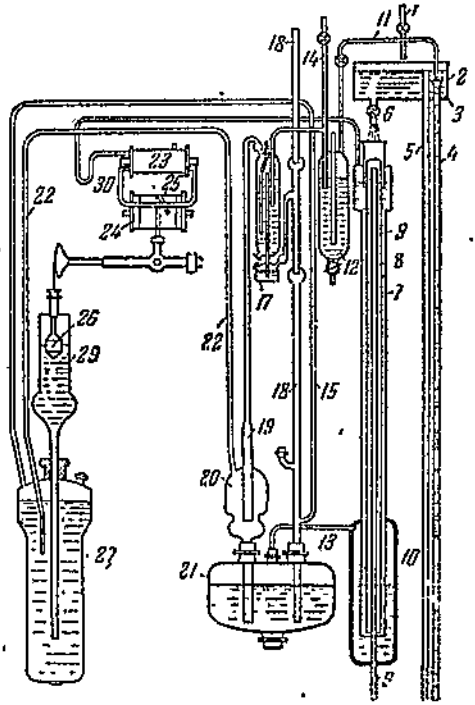


Рис. 207. Химический газоанализатор ГУ-40:

1 — водоподающая труба; *2* — распределительный бачок; *3*, *4* — эжектор; *5* — переливная труба; *6* — регулирующий кран; *7* — напорная труба; *8*, *9* — сифон; *10* — силовой сосуд; *11* — вакуумная труба; *12* и *17* — гидравлические затворы; *13* — воздушная трубка; *14* — газовая трубка; *15*, *18* — выхлопные трубки; *19* — газоподающая трубка; *20* — волюмометр; *21* — затворный сосуд; *22* — трубка поглотительного сосуда; *23* — ртутный манометр; *24* — часовой механизм с диаграммной лентой; *25* — перо; *26* — поплавок; *27* — поглотительный сосуд; *29* — измерительная воронка; *30* — падающая дужка.

Под давлением воздуха затворная жидкость (раствор поваренной соли) поднимается из сосуда *21* в волюмометр *20* и одновременно в трубках *15* и *18*, закрывая сообщение внутренней полости поглотительного сосуда с атмосферой.

Отмеривание порции газа происходит в момент перекрытия поднимающейся жидкостью нижнего конца трубки *19*. Для поддержания в момент отмеривания давления в волюмометре постоянным излишек газа из волюмометра выдавливается по трубке *19* в атмосферу через гидравлический затвор *17*, высота которого определяет величину давления.

Отмеренная порция газа при дальнейшем поднятии затворной жидкости в волюмометре продавливается по трубке *22* через слой поглощающего раствора (раствор едкого кали) в сосуде *27*. Непоглотившаяся часть газа, собираясь в верхней части сосуда, повышает в нем давление и вызывает подъем поглощающей жидкости в воронку *29*. Высота подъема жидкости в воронке *29*, а следовательно, положение поплавка, находящегося в ней, будет зависеть от величины непоглощенной части газовой смеси.

Перед окончанием анализа вода, поднимаясь в трубке *7*, закроет нижнее отверстие приемной воронки и воздух, оставшийся в верхней части трубы *7*, начнет сжиматься и давление его по соединительной трубке будет передано ртутному манометру *23*, выполненному по типу кольцевых весов. Давление воздуха вызовет поворот кольцевых весов *23*, и дужка *30*, связанная с весами, освободит на несколько секунд перо, прижатое к диаграммной ленте. Перо получает возможность установиться в новое положение, соответствующее конечному положению поплавка в воронке *29*.

Наполнение водою напорного бака *10*, а также трубок *7* и *8* продолжается до тех пор, пока уровень воды не достигнет верха сифона *8—9*. После этого действием сифона вода удаляется из сосуда *10* по трубе *9* сифона в дренаж. Сифон убирает значительно больше воды, чем ее притекает через кран *6*, вследствие чего сосуд *10* быстро опоражнивается. При этом давление воздуха в верхней части трубки *7* быстро упадет и манометр *23* возвратится в начальное положение, дужка *30* прижимает перо, фиксируя его положение до следующего анализа.

Падение давления воздуха в сосудах *10* и *21* вызовет возвращение затворной жидкости из волюмометра *20* и трубок *15*, *18* и *19* обратно в сосуд *21*. Образовавшееся в волюмометре вследствие этого разрежение вызовет засос в волюмометр через отросток трубки *14*, гидравлический затвор *17* и трубку *19* новой порции газа.

Одновременно с падением жидкости в трубке *18* откроется отверстие трубки *15* и остаток газа из поглотительного сосуда через трубки *15* и *18* будет выброшен в атмосферу. По окончании действия сифона вода снова начнет прибывать в сосуде *10*, поднимающийся уровень ее перекроет нижние концы трубок *7* и *8*, начнется сжатие воздуха в сосуде *10* и новый цикл работы анализатора в описанном порядке.

Прибор перед пуском в действие заполняется соответствующими жидкостями. Затворный сосуд *21* заливается до красной метки раствором поваренной соли через отверстие, закрываемое пробкой на трубке *18*. Поглотительный сосуд *27* наполняется рас-

твором едкого кали уд. в. 1,27 через воронку *29* при вынутом поплавке. Затворные сосуды *12* и *17* заполняются до красных меток вазелиновым маслом, а манометр *23* ртутью. Перед пуском прибора необходимо убедиться в герметичности всех соединений прибора и газопроводной линии, затем проверить его работу на воздухе при закрытом кране *14*, отрегулировав длину тяги поплавка так, чтобы перо доходило до нулевой линии диаграммы. После получасовой работы прибора на воздухе и устранения всех возможных дефектов и неполадок открытием крана *14* включают газоанализатор в работу.

Шкалы газоанализаторов типа ГУ выполняются в пределах 0—20, 0—40%.

Газоанализатор делает 25—30 анализов в час. Ширина диаграммной ленты 40 *мм*. Расход воды 100 *л/час*.

Аналогичное устройство имеют газоанализаторы типа «симплекс» марки ГК для определения содержания кислорода, работа которых основана на смешивании исследуемого газа с определенным объемом водорода, пропускании смеси через печь, где кислород полностью соединяется с водородом в воду, конденсации образующихся водяных паров и измерении остатка газа.

Пределы измерения 0—5, 0—20%.

На том же принципе построен газоанализатор для определения водорода. Водород газовой смеси сжигается с воздухом, определенный объем которого примешивается к исследуемому газу.

Газоанализатор на водород марки ГВ-20-253 имеет шкалу 0—20, 0—10, 90—100, 0—40, 40—80 и 60—80%.

Предел погрешности газоанализаторов ГУ, ГК и ГВ 0,3—1,0%.

Автоматический газоанализатор ГД-3 типа «дуплекс» для определения углекислоты и суммы $CO+H_2$ в дымовых газах. От газоанализатора ГУ-40/42 отличается наличием печи для сжигания $CO+H_2$ и переключателя.

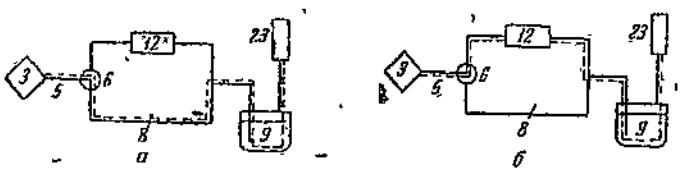


Рис. 208. Схема действия газоанализатора дуплекс:

3 — волюмометр; *5* и *8* — соединительные трубки; *6* — распределительный кран; *9* — поглотительный сосуд; *12* — дожигательная печь; *23* — измерительный колокол.

Два периода работы газоанализатора показаны на рис. 208. Первый период — определение углекислоты. Отмеренный в волюмометре *3* объем газа через распределительный кран *6* поступает по трубке *8* в поглотительный сосуд *9*, а остаток газа переходит в измерительный колокол *23*. Во втором периоде, наступающем

вслед за первым, объем газа из волюмометра *3* через переставленный в новое положение распределительный кран *6* направляется

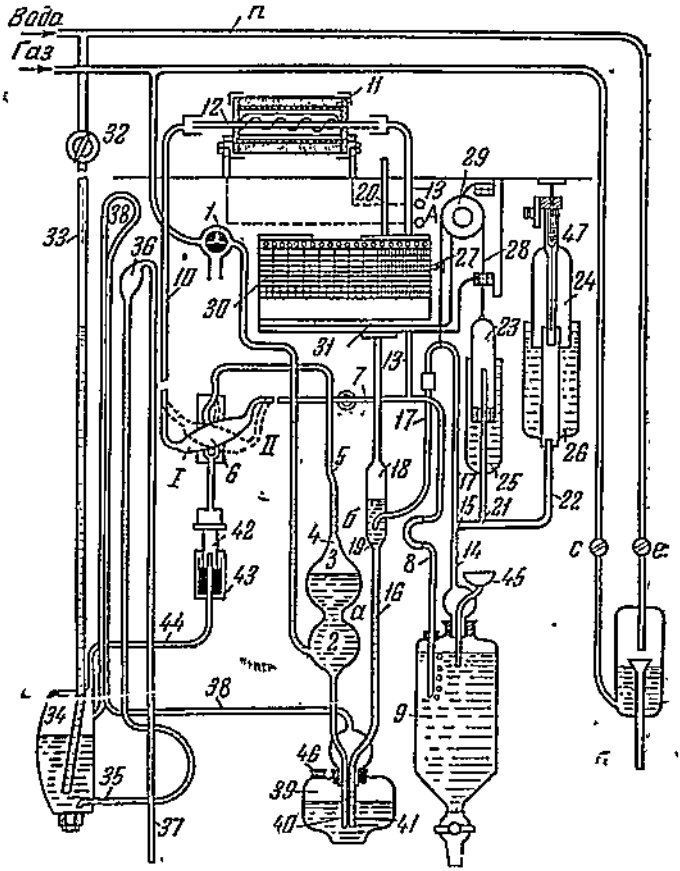


Рис. 209. Химический газоанализатор ГД-3:

1 — трехходовой кран; *2* и *3* — волюмометр; *5* — соединительная трубка; *6* — переключатель; *7*, *8*, *10*, *13*, *14*, *15*, *16*, *17*, *21* и *22* — соединительные трубки; *9* — поглотительный сосуд; *11* — электропечь; *12* — труба электропечи; *18* и *19* — гидравлический затвор; *20* — выхлопная трубка; *23* и *24* — измерительные колокола; *25* и *26* — сосуды измерительных колоколов; *28* — нить подвески колокола; *27* — перо; *29* — блок нити; *30* — диаграммная лента; *31* — часовой механизм; *32* — водяной кран; *33* — напорная труба; *34* — силовой сосуд; *35*, *36* и *37* — сифон; *38* — воздушная труба; *39* — затворный сосуд; *40* — трубка волюмометра; *41* — трубка гидравлического затвора; *42* — колокол переключателя; *43* — ртутный затвор; *44* — соединительная трубка; *45* — воронка для залива поглотительного раствора; *46* — пробка напорного сосуда; *47* — упор измерительного колокола.

в дожигательную печь *12*, где окись углерода окисляется до углекислоты, а водород до воды. Образовавшаяся углекислота вместе

с углекислотой, первоначально содержавшейся в исследуемой смеси, поглощается раствором едкого кали в поглотителе *9*. Остаток газа измеряется в колоколе *23*. Разность между первым и вторым определением дает количество содержащихся в газовой смеси $CO+H_2$.

Устройство прибора схематически показано на рис. 209. Вода для действия силовой части прибора поступает через кран *32* в трубу *33* напорного устройства и по трубе *n* через кран *e* в эжектор для просасывания газа. Давление воздуха, сжимаемого водяным столбом, в сосуде *34* по трубке *38* передается в затворный сосуд *39*. Поднимающаяся из сосуда *39* затворная жидкость заполняет волюмометр *2—3* и, одновременно поднимаясь по трубке *16*, отсекает в затворе *18* сообщение внутренней полости поглотительного сосуда *9* с атмосферой.

Газ поступает в волюмометр через трехходовой кран *1*, а отмеренная порция его из волюмометра *3* по трубке *5* через переключатель *6* направляется либо в поглотительный сосуд по трубкам *7—8*, либо по трубке *10* в печь для сожжения *11*. В печи газ проходит через фарфоровую трубку *12*, наполненную окисью меди и обогреваемую электрическим нагревателем, и далее по трубкам *13—8* в поглотительный сосуд (соответствующее последнему случаю положение переключателя изображено на рис. 209 пунктиром).

Остаток газа после поглощения углекислоты по трубке *14* может от разветвления *15* пойти по трубкам *21* и *22* под измерительные колокола *23* и *24* или по трубке *17* через затвор *18* выйти в атмосферу.

Поступление газа под колокола начнется тогда, когда затворная жидкость из сосуда *39*, поднимаясь по трубке *16*, перекроет в затворе *18* отверстие *19* трубки *17*.

Это перекрытие наступает в момент начала отмеривания порции газа для анализа (150 $см^3$), т. е. когда жидкость в волюмометре достигнет метки *a* на шейке между сосудами *2* и *3*.

Дальнейший подъем жидкости в волюмометре до метки *b* вытеснит полностью измеренный объем газа в поглотительный сосуд и далее под измерительные колокола. Чем больше содержание углекислоты в газовой смеси, тем меньше, очевидно, будет объем газа, поступающего в измерительные колокола.

В момент достижения затворной жидкостью метки *b* волюмометра вода в силовом устройстве достигает верха сифона *36*, действием которого опоражнивается сосуд *34* и затворная жидкость падает из волюмометра и трубки *16* в затворный сосуд, засасывая в волюмометр через кран *1* новую порцию газа и одновременно давая выход газу из-под колоколов *23* и *24* в атмосферу через трубки *17—18*. Регистрация результатов анализа производится колоколом *23*.

Веса и объемы колоколов *23* и *24* подобраны таким образом, что в первую очередь всплывает колокол *24* до упора *47*, причем в него поступает 80% объема отмеренной волюмометром порции газа. После остановки упором подъема колокола *24* начинает подниматься колокол *23*, принимая остаток объема газа.

Следовательно, высота подъема колокола *23* обратно пропорциональна содержанию углекислоты в газовой смеси. Максимальная величина подъема будет при работе прибора на воздухе, т. е. при нулевом содержании углекислоты. Колокол *23* связан нитью *28*, переброшенной через ролик *29*, с пером *27*. Перемещение пера, и следовательно, длина прочерчиваемой им линии, равны высоте подъема колокола *23*.

Работа прибора протекает с периодическим чередованием циклов анализа, т. е. отмеренная порция газа поступает в поглотительный сосуд непосредственно, следующая направляется через печь, затем периодичность повторяется.

При сжигании окиси углерода в печи в газовой смеси увеличится содержание углекислоты, так как один объем окиси углерода дает при окислении один объем углекислоты, следовательно, при наличии в газовой смеси окиси углерода соответствующий анализ покажет увеличение содержания углекислоты, т. е. колокол *23* поднимется на меньшую высоту, чем при анализе без дожигания. В том же направлении действует и присутствие водорода, так как водород в печи сгорает в воду, которая, конденсируясь в поглотительном сосуде, уменьшает объем остаточного газа под колоколами на величину объема водорода, содержащегося в газовой смеси. Таким образом, при чередовании анализов, в случае присутствия окиси углерода и водорода, на диаграмме получится чередование более длинных и коротких штрихов, разность длин которых будет показывать объемное содержание в газовой смеси $CO+H_2$, а длинные штрихи — содержание углекислоты. Вид подобной диграммы показан на рис. 210.

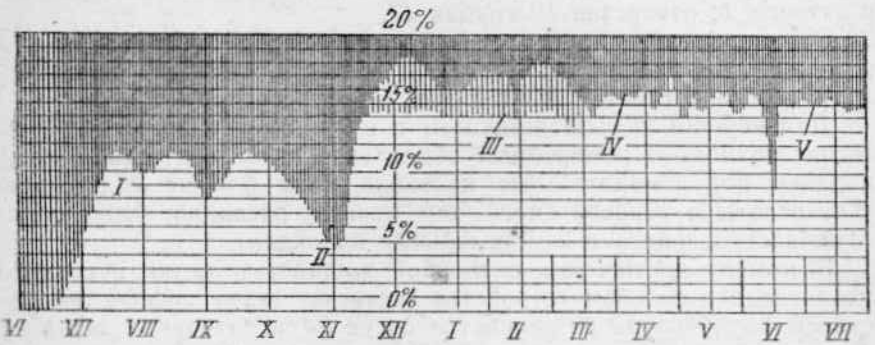


Рис. 210. Диаграмма газоанализатора ГД-3.

Чередование анализов выполняется ртутным переключателем *6*, перебрасывание которого производится тем же силовым устройством при помощи колокола *42*, плавающего в ртутном затворе *43*. Колокол нагружен постоянным грузом и связан с серьгой, сцепленной с переключателем. Под колокол *42* по трубке *44* из напорного сосуда *34* передается давление воздуха, поднимающее колокол вверх. При окончании анализа с падением давления в си-

ловом устройстве колокол *42* под действием груза опускается вниз и серьга перебрасывает переключатель в другое положение.

Дожигательная печь *11* питается от сети переменным или постоянным током напряжением 110 или 220 *в*.

Газоанализаторы ГД предназначены для определения CO_2 в пределах 0—20; 0—40% и смеси $CO+H_2$ в пределах 0—5%.

Автоматический газоанализатор Моно-симплекс для определения углекислого газа, сернистого газа и аммиака. Газоанализатор Моно-симплекс отличается от описанных выше электромеханическим силовым устройством и применением ртути в качестве запорной жидкости. Принципиальная схема работы прибора ничем не отличается от представленной на рис. 209.

На рис. 211 изображено схематически устройство прибора. Силовое устройство состоит из бесколлекторного электромотора переменного тока *20*, соединенного с редуктором *21*, понижающим число оборотов до 1 об/мин. Кулачковым устройством, действующим на рычаг *14*, мотор приводит в возвратно-поступательное движение поршень *13*, движущийся в цилиндре *12*, наполненном ртутью.

Работа силового устройства идет в такой последовательности. Электромотор *20* медленно вдавливает поршень *13* в ртуть цилиндра *12*, повышая ее уровень в волюмометре *4* и затворе *5*. В момент достижения поршнем наинизшего положения, отвечающего моменту окончания анализа, кулачковый механизм расцепляется и одновременно мотор выключается меркоидом *16*.

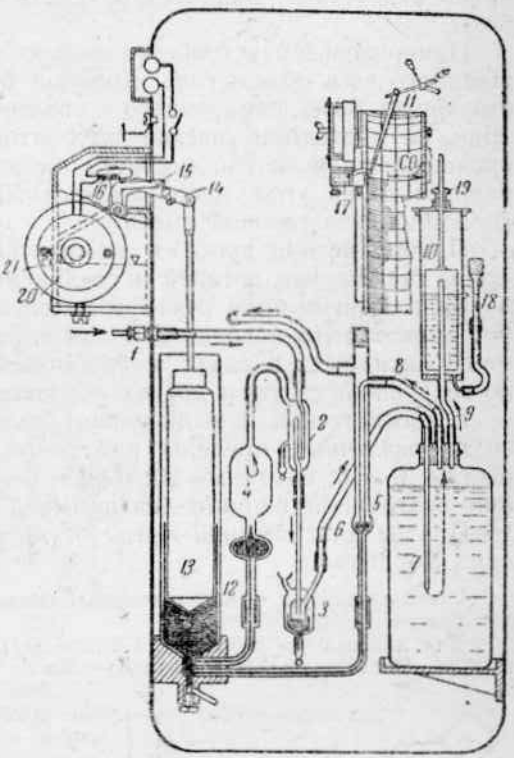


Рис. 211. Газоанализатор Моно-симплекс: *1* — газопровод; *2* и *3* — гидравлические затворы; *4* — волюмометр; *5* — отсечный затвор; *6* — соединительная трубка; *7* — поглотительный сосуд; *8—9* — выхлопные трубки; *10* — измерительный колокол; *11* — перо; *12* — силовой цилиндр; *13* — поршень; *14* — рычаг включателя; *15* — отросток рычага включателя; *16* — ртутный включатель; *17* — часовой механизм; *18* — трубка для наполнения ванны колокола; *19* — шток колокола; *20* — электромотор; *21* — редуктор.

Поршень *13* свободно всплывает в ртути; падение уровня рту-

ти в волюмометре *4* засасывает из трубопровода *1* через затвор *2* новую порцию газа, а падение уровня ртути в затворе *5* позволяет выйти по трубкам *9* и *8* газу из-под колокола *10*, чем прибор подготовляется к следующему анализу.

Когда поршень *13* достигнет наивысшего положения, упор на рычаге *14* встречает отросток *15* рычага меркоида и мотор, включаясь в действие, начинает опускать поршень, повторяя цикл работы.

Измерительное устройство состоит из одного колокола *10*, вмещающего весь объем газа. Колокол большую часть пути, соответствующую 80% отмеренного объема, проходит вхолостую и лишь на последнем участке пути шток колокола входит в соприкосновение с рычагом, сидящим на оси пера, заставляя его поворачиваться на угол, пропорциональный содержанию определяемого компонента газовой смеси.

Прибор весьма прост и компактен, с минимальным количеством стеклянных деталей и соединений.

Благодаря выбору ртути в качестве затворной жидкости прибор может быть использован для определения содержания сернистого ангидрида в газах колчеданных печей, аммиака в аммиачно-воздушной смеси и других поглощаемых газов.

В соответствии с назначением прибора шкала его устраивается на различные пределы измерений. Нормально применяются шкалы: 0—10; 0—12; 0—20; 0—25; 0—40; 0—50; 0—60 и 0—100% при постоянной ширине диаграммной ленты, равной 70 *мм*.

Привод диаграммной ленты от часового механизма или от мотора Уоррена.

Газоанализаторы с электрическим силовым приводом строятся нашими заводами:

Для анализа на аммиак (ГА-21/23—212) со шкалами 0—20; 0—30 и 0—40%. Поглотительной жидкостью служит раствор серной кислоты уд. в. 1,27.

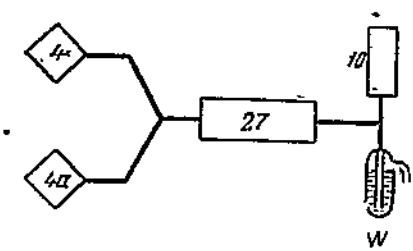


Рис. 212. Схема работы газоанализатора для определения кислорода.

4 — волюмометр газа; *4а* — волюмометр водорода; *10* — измерительный колокол; *27* — электропечь; *W* — конденсатный сборник.

Для анализа на сернистый газ (ГС-2Р-212) со шкалой 0—20%. Поглощающей жидкостью является кислый раствор двухромовокислого калия.

Для анализа на углекислоту [ГУ-50/51-212] со шкалами 0—20 и 0—40%.

Для анализа на хлор (ГХ-20/21-212) со шкалами 0—60 и 40—100% и на хлористый водород (ГХВ-10/11-212) со шкалами 0—40 и 40—60%.

В газоанализаторах на хлор и хлористый водород затворной жидкостью служит серная кислота уд. в. 1,84, а поглотителем раствор едкого кали уд. в. 1,27.

Автоматический газоанализатор Моно для определения кислорода. Для определения содержания в газовой смеси кислорода используют легкость соединения его с водородом, причем при избытке последнего кислород вступает в соединение количественно. На рис. 212 представлена схема работы прибора.

Прибор снабжен двумя волюмометрами *4* и *4а*, из которых первый служит для отмеривания порции испытуемого газа, а второй для отмеривания

определенного объема чистого водорода. Смесь обоих газов проходит через электрическую печь *27*, где кислород сжигает прибавленный водород в воду. Вода, конденсируясь, собирается в конденсатосборнике *W*, откуда избыток непрерывно удаляется через открытый перелив, а остаток газовой смеси с избытком водорода измеряется под колоколом *10*.

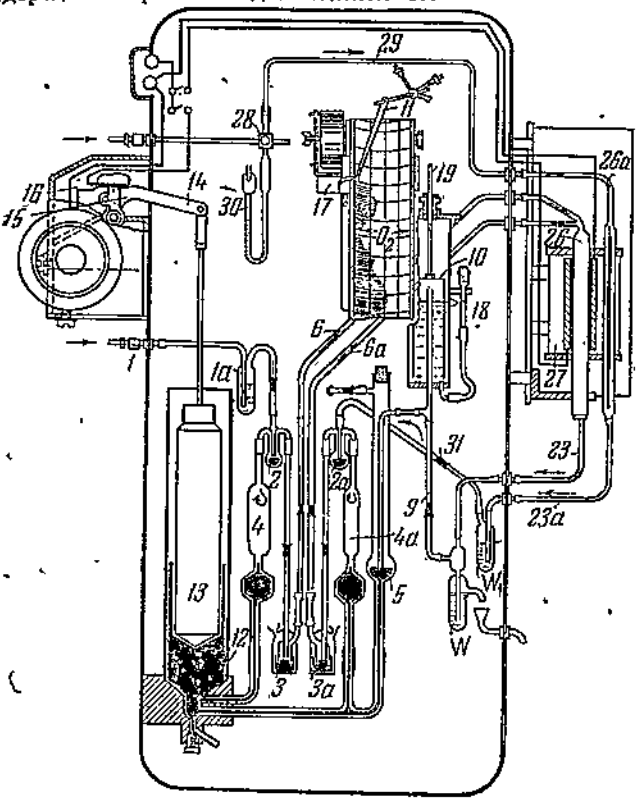


Рис. 213. Газоанализатор Моно для определения кислорода:

1 — газопровод; *1а* — гидравлический затвор; *2* и *2а* — соединительные трубки; *3* и *3а* — гидравлические затворы; *4* — волюмометр газа; *4а* — волюмометр водорода; *5* — отсекающий затвор; *6* и *6а* — трубки подачи газа к печам; *10* — измерительный колокол; *11* — перо; *12* — силовой цилиндр; *13* — поршень; *14* — рычаг; *15* и *16* — выключатель; *17* — часовой механизм; *18* — трубка для наполнения ванны колокола; *23* и *23а* — соединительные трубки; *26* и *26а* — реакционные трубки электропечей; *27* — электропечь; *28* — регулирующий кран; *29* — труба подачи водорода; *W* и W_1 — сборники конденсата.

Уменьшение объема газов равно количеству содержавшегося в исследуемом газе кислорода. Рис. 213 схематически изображает устройство прибора. Силовая и регистрирующая части прибора тождественны с газоанализатором Моно-симплекс и основное отличие заключается в отсутствии поглотительного сосуда, наличии дожигательной печи и двойном волюмометрическом устройстве.

Исследуемый газ по трубе *1* через затвор *1а* и *2* поступает в волюмометр *4*. Параллельно водород через кран *28* и трубу *29* проходит через раскаленную трубу *26а* электропечи, заполненную платинированным асбестом, для освобождения от могущей быть примеси кислорода. Из печи очищенный водород по трубе *23а* через водяной затвор и ртутный затвор *2а* поступает в волюмометр *4а*. При начале цикла нагнетания оба газа по трубкам *6* и *6а* поступают в трубу *26* электропечи *27*. По выходе из печи по трубе *23* остаток газов, содержащий образовавшиеся пары воды, проходит через конденсатоуловитель *W* под измерительный колокол. Начало измерения под колоколом соответствует поднятию уровня ртути в обоих волюмометрах до нижней метки на шейке, разделяющей два расширения волюмометра, так как в этот момент ртуть в отсекающем затворе *5* закроет выход газа в атмосферу (это положение изображено на рис. 213).

Запись производится тем же способом, как и в приборе Моно-симплекс.

Нормальные шкалы кислородного газоанализатора имеют пределы: 0—4; 0—8; 0—10; 0—12 и 0—20% при ширине диаграммной ленты 70 *мм*.

Для специальных случаев прибор может быть построен для пределов измерения 40—60 и 80—100%.

Газоанализаторы для горючих газов. Для анализа генераторных, доменных и коксовых газов, содержащих большие количества окиси углерода и водорода, применяются также автоматические газоанализаторы типа Моно, определяющие содержание углекислоты, окиси углерода и водорода.

Устройство этих газоанализаторов аналогично устройству газоанализаторов «дуплекс», описанных выше. Схема же их работы несколько отличается от обычных.

Определение углекислого газа производится поглощением едким кали с последующим измерением объема; содержание $CO+H_2$ и H_2 определяется предварительным сжиганием этих компонентов в электрической печи, наполненной окисью меди, с последующим поглощением образовавшейся углекислоты и измерением объема остатка газа после поглощения.

Особенностью этого газоанализатора является регенерация восстановленной окиси меди струей воздуха.

На рис. 214 и 215 приведены схемы отдельных стадий работы подобного газоанализатора.

а) Определение содержания углекислоты (рис. 214). Определенный объем газа, отмеренный волюмометром *A*, передавливается через переключатель *B* в поглотительный сосуд *D*, а из последнего в измерительный колокол *E*. Разность между первоначальным объемом газа и объемом, измеренным колоколом *E*, представляет объемное содержание углекислоты в исследуемом газе. Незаштрихованная часть диаграммы будет соответствовать процентному содержанию углекислоты.

б) Регенерация окиси меди (рис. 214). Одновременно с выполнением определения содержания углекислоты производится регенерация окиси меди, частично восстановленной во время предыдущего цикла. Регенерация выполняется просасыванием воздуха специальным инжектором из трубки F_1 через переключатель B_1, электрическую печь *C*, переключатель *B* и трубу *F*. За время выполнения анализа на углекислоту восстановленная медь успевает полностью окислиться до окиси меди.

в) Определение суммарного содержания окиси углерода и водорода (рис. 215). Следующей стадией цикла прибора будет определение содержания $CO+H_2$; отмеренный объем газа из волюмометра *A* в этом случае направляется через переключатель *B*, установленный в новое положение, в печь *C*. Окись углерода и водород сгорают за счет кислорода окиси меди в углекислоту и воду. Из печи через переключатель B_1, также переставленный в новое положение, газ поступает в поглотительный сосуд *D*, где поглощается углекислота, как первоначально содержавшаяся в исследуемом газе, так и образовавшаяся от окисления окиси углерода. Пары воды, образовавшейся из водорода, конденсируются в поглотительном сосуде и их объем также исключается. Из поглотительного сосуда остаток газа поступает в колокол *E* для измерения. Разность объемов первоначального и измеренного дает суммарное содержание углекислоты, окиси углерода и водорода в исследуемом газе. Так как стадии *1* и *3* поочередно следуют одна за другой, то разность двух

последовательных анализов на диаграмме даст содержание $CO+H_2$. Вид диаграммы показан на рис. 216.

В отдельных случаях бывает необходимо определить только лишь содержание водорода. Это возможно выполнить данным газоанализатором следующим образом.

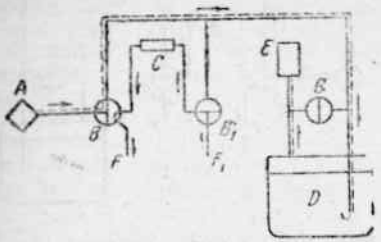


Рис. 214. Схема работы газоанализатора для горючих газов. Определение углекислоты:

A — волюмометр; B и B_1 — переключатели; C — электрическая печь; D — поглотительный сосуд; E — измерительный колокол; F и F_1 — соединительные трубки; G — кран.

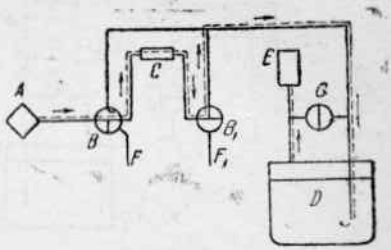


Рис. 215. Схема работы газоанализатора для горючих газов. Определение окиси углерода и водорода:

A — волюмометр; B и B_1 — переключатели; C — электрическая печь; D — поглотительный сосуд; E — измерительный колокол; F, F_1 — соединительные трубки; G — кран.

Определение водорода. Для определения водорода переставляют кран G в положение, соединяющее волюмометр A с измерительным колоколом E в обход поглотительного сосуда. Тогда аппарат работает следующими стадиями:

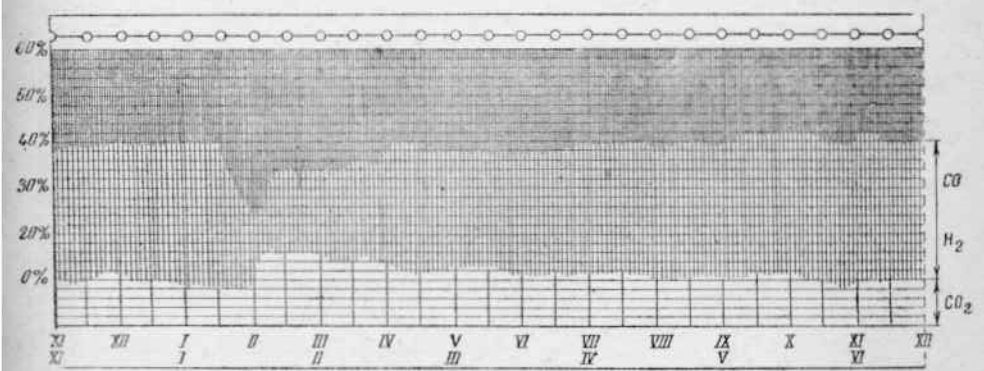


Рис. 216. Диаграмма газоанализатора для горючих газов. Определение содержания CO_2 и $CO + H_2$.

а) Контроль нулевой линии и регенерация окиси меди (рис. 217). Отмеренное количество газа из волюмометра A через переключатель B и кран G непосредственно поступает под измерительный колокол E. Так как при этом отмеренный объем газа не изменяется, перо прочерчивает всю ширину диаграммы, достигая нулевой линии.

Во время этого процесса инжектор через трубу F_1, переключатель B_1, печь C, переключатель B и трубу F просасывает сильную струю воздуха,

окисляющую частично восстановленную медь до окиси меди, подготовляя таким образом печь для следующего анализа.

б) Определение водорода (рис. 218). Вторая стадия цикла — определение водорода — протекает следующим способом. Отмеренная порция газа из во-

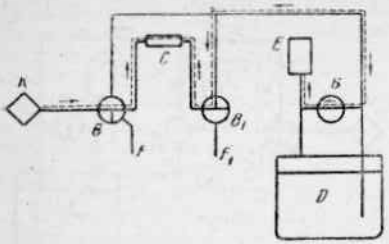


Рис. 217. Схема работы газоанализатора для горючих газов. Контроль нулевой линии:

A — волюмометр; B и B_1 — переключатели; C — электрическая печь; D — поглотительный сосуд; E — измерительный колокол; F, F_1 — соединительные трубки; G — кран.

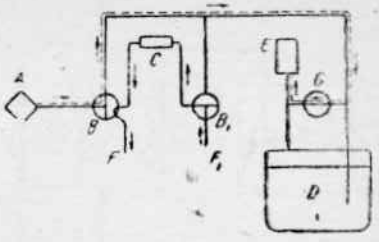


Рис. 218. Схема работы газоанализатора для горючих газов. Определение водорода:

A — волюмометр; B и B_1 — переключатели; C — электрическая печь; D — поглотительный сосуд; E — измерительный колокол; F и F_1 — соединительные трубки; G — кран.

люмометра A через переключатель B поступает в печь для сжигания и из нее через переключатель B_1 и кран G в измерительный колокол. Так как при сжигании CO в CO_2 объем газа не изменяется, то уменьшение объема происходит только за счет сгорания водорода и конденсации образующихся паров воды в специальном конденсаторе, включенном в линию печь — измерительный колокол. Разность объемов будет соответствовать поэтому содержанию водорода.

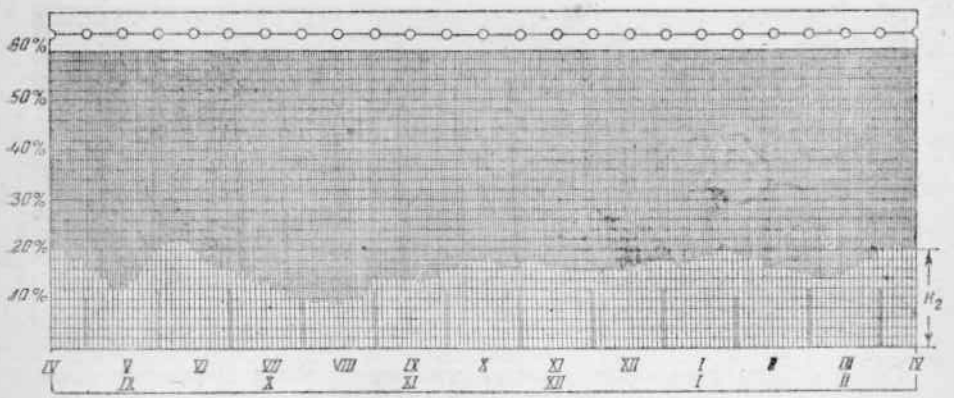


Рис. 219. Диаграмма газоанализатора для горючих газов. Определение водорода.

Стадии a и b чередуются друг с другом, и диаграмма приобретает вид, изображенный на рис. 219.

Следует отметить, что перестановка переключателей B и B_1 во всех случаях производится автоматически, перестановка же крана G выполняется

от руки, чем газоанализатор настраивается либо на определение $CO + H_2$, либо на определение одного водорода.

Газоанализаторы «триплекс» отечественного производства имеют шкалы: CO_2 0—20%; H_2 40—60%; CO 0—20% и CO_2 0—20%; H_2 0—13%; CO 0—40%.

Газоанализатор Эккардта. Все рассмотренные химические газоанализаторы выполняют определения периодически, что в отдельных случаях не вполне отвечает запросам контроля технологического процесса. Газоанализатор Эккардта устраняет этот недостаток, непрерывно отмечая все изменения в составе газовой смеси. Газоанализатор принадлежит к типу «симплекс», давая определения только одного компонента, и пригоден для всех поглощающихся газов, как углекислота, сернистый газ, аммиак, хлор и т. п.

Схема работы газоанализатора, представленная на рис. 220, заключается в следующем. Исследуемый газ проходит непрерывной струей по трубопроводу *6*. Часть его ответвляется через клапан регулятора *7* в трубу *5*, в которой установлена диафрагма *2*. Регулятор *7* поддерживает постоянную величину перепада давления на диафрагме *2*, а следовательно, постоянный расход газа через диафрагму.

После диафрагмы газ проходит, барботируя через поглотительную жидкость в сосуде *1*, и остаток его, после поглощения, по трубе *4* и малое отверстие диафрагмы *3* уходит в атмосферу.

Давление газа перед диафрагмой *3* будет зависеть от количества газа, поступающего в трубу *4*, т. е. от содержания в газе подлежащего определению компонента. Это давление измеряется чувствительным манометром *8*, шкала которого градуирована в процентах содержания искомой составной части газа.

Манометр *8* может быть указывающим, регистрирующим, а также снабженным дальнодействующей передачей. Прибор очень прост и показывает с достаточной точностью изменение состава газа.

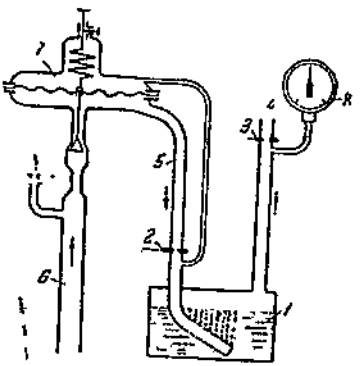


Рис. 220. Схема газоанализатора Эккардта:

1 — поглотительный сосуд, *2* и *3* — диафрагмы; *4* — выхлопная труба; *5* — труба подачи газа; *6* — главный газопровод; *7* — регулятор расхода газа; *8* — измеряющий манометр.

48. Условия установки и работы химических газоанализаторов

Правильная и бесперебойная работа газоанализатора обеспечивается выполнением определенных условий установки и обслуживания, которые распадаются на две части: установка самого прибора и обеспечение подачи к прибору исследуемого газа.

Установка газоанализатора. При установке газоанализатора должно быть соблюдено следующее:

а) Газоанализатор должен быть прочно прикреплен в строго вертикальном положении к стене или специальному щиту и защищен от вибраций, сотрясений, воздействия атмосферных осадков и воздушных потоков.

б) Газоанализатор должен быть изолирован от внешнего воздействия агрессивных газов и от доступа к нему атмосферы, содержащей взрывоопасные примеси. В этих случаях необходимо газоанализатор помещать в специальную кабину, снабженную приточной вентиляцией, способной создать внутри кабины небольшое избыточное давление порядка 2—3 *мм* вод. ст.

в) Газоанализатор должен быть защищен от резких колебаний температуры, искажающих результаты объемных измерений газа. В помещении, где находится газоанализатор, должна поддерживаться постоянная температура, лежащая в пределах 15—40°. Наиболее желательна температура в 20°, соответствующая температуре градуировки прибора.

г) Газ, поступающий в газоанализатор, должен быть очищен от механических примесей фильтрацией и от сернистых соединений (сероводород, сернистый газ) промывкой. Максимально допустимое содержание механических примесей 0,05 *г/м*³. Температура газа при поступлении в газоанализатор не должна превышать 40°. Наилучшей температурой газа будет температура окружающей среды.

д) Вода, подводимая к газоанализатору, должна быть чистой, свободной от механических примесей и не содержащей химически активных веществ. Напор воды должен поддерживаться постоянным, поэтому для питания водой целесообразна установка отдельного напорного бачка с постоянным уровнем. Температура воды, поступающей в газоанализатор, не должна выходить из пределов 10—40° и должна поддерживаться по возможности постоянной.

е) Напряжение тока, питающего газоанализатор, должно быть 110 или 220 *в*. Колебания напряжения допустимы не выше ± 10% от номинальной величины.

Забор и подача газа к прибору. Правильность забора газа определяется получением действительно средней его пробы, т. е. пробы, по своему составу тождественной со всей массой газа в газопроводе. Исследуемый газ может двигаться по металлическому газопроводу или по кирпичному каналу.

В случае забора газа из металлического газопровода достаточно погрузить заборную трубку до половины диаметра газопровода, обеспечив герметичность соединения ее со стенкой газопровода. При заборе чистого газа заборная трубка снабжается на должном расстоянии от конца ниппелем; при помощи ниппеля заборная трубка ввертывается на прокладке в бобышку, приваренную к стенке трубопровода.

Отбор печных газов из кирпичных каналов требует принятия мер предосторожности. Для получения правильной средней пробы газа необходимо:

не помещать конец заборной трубки в газовый мешок или застойное место канала в стороне от главного потока газа;

при прочих равных условиях выбирать место забора в суженных местах канала, где газовый поток вследствие повышения скорости и турбулентного характера движения лучше перемешивается;

в каналах, где давление газа ниже атмосферного, не располагать заборную трубку вблизи люков, заслонок и других отверстий или неплотностей в газоходе, чтобы подсос воздуха не изменил состава отбираемой пробы газа;

заборную трубку опускать в канал на глубину ⅓—½ его сечения; при заборе горячих газов из горизонтальных каналов ко-

нец заборной трубки располагать в верхней трети сечения газохода, так как поток горячего газа движется, прижимаясь к верхней поверхности газохода.

Правильный выбор места забора еще не гарантирует правильности работы газоанализатора, так как отобранная проба газа может изменить свой состав во время транспортировки ее от места забора к прибору.

Для обеспечения неизменности состава отобранной порции газа необходимо соблюдать следующие условия.

Заборная трубка должна быть выполнена из материала, не вступающего в химическое взаимодействие с отдельными составными частями газовой смеси при температуре отбора газа. При температурах ниже 300° можно применять трубки из меди, латуни, стали, свинца (температура $< 250°$); забор газа с температурой от 300 до 600° следует производить трубками из нержавеющей стали (Я1 и Ж17), при более высоких температурах (выше 600°) трубками из кварца или фарфора.

Если при температуре отбора газа подобрать инертный материал для трубки затруднительно, заборную трубку необходимо снабдить охлаждающим кожухом с принудительным воздушным или водяным охлаждением.

Заборная и газопроводные трубки на всем протяжении должны быть совершенно герметичны и обеспечены от засорения, образования водяных или смоляных пробок и т. п. Кроме того, объем всей газоподводящей системы от места забора до прибора должен быть минимальным для уменьшения запаздывания анализов. Диаметр газоподводящих трубок выбирается с учетом обоих требований в пределах 4—12 *мм*. Чем более загрязнен газ, тем больший диаметр трубки следует выбирать.

Вся система подвода газа к прибору должна снабжаться приспособлением для ее продувки сжатым воздухом или паром.

При отборе запыленного газа конец заборной трубки обязательно снабжается керамиковым фильтром.

Заборную трубку следует располагать горизонтально с уклоном в сторону движения газа под углом 20—25° к горизонтали. Вертикального расположения заборных трубок с фильтром внизу следует избегать вследствие опасности засорения трубки конденсирующейся водой или смолами. В крайнем случае при необходимости вертикальной установки заборной трубки ее следует делать с обогревом, исключающим возможность конденсации.

Герметичность газоподводящей системы должна проверяться воздушным давлением в 0,5 *кг/см*^{2}.

Соединительные трубопроводы от заборной трубки к прибору укладываются на горизонтальных участках с уклоном 5—6° в направлении движения газа. Изменение направления труб выполняется вместо колен крестовинами, два свободных отростка которых закрываются пробками. Этот способ монтажа обеспечивает легкую очистку прямых участков соединительного трубопровода.

В случае высокой температуры газа и насыщения его влагой в начале соединительного трубопровода за заборной трубой уста-

навливается холодильник для понижения температуры газа до 40° и конденсации влаги. Ниже холодильника помещается приемник для конденсата со свободным сливом и гидравлическим затвором (рис. 221).

При давлении газа в газоходе выше атмосферного никаких приспособлений для подачи газа к газоанализатору не требуется, кроме регулятора давления, снижающего давление газа до 100—200 *мм* вод. ст.

Если давление газа близко к атмосферному (±50 *мм* вод. ст.), необходимо эжекторное устройство, обычно входящее в конструкцию газоанализатора. В случае высокого разрежения в газоходе приходится применять аспирационное устройство.

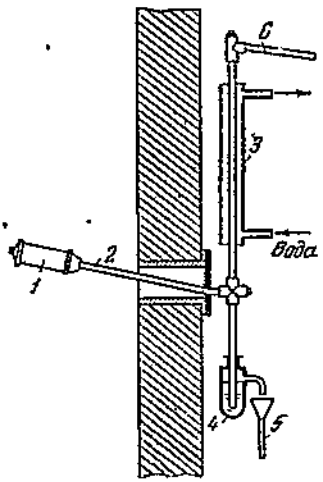


Рис. 221. Установка газового холодильника:

1 — керамиковый фильтр; *2* — труба для забора газа; *3* — газовый холодильник; *4* — сборник конденсата; *5* — труба для стока конденсата; *6* — труба к газоанализатору.

Наиболее простым и удобным является аспирационное устройство периодического действия, хотя оно увеличивает запаздывание прибора.

Фильтры для газа. Забор газов запыленных, с высоким смолосодержанием, а также содержащих вредные химические примеси требует установки фильтров, освобождающих газ от загрязнений.

При высоких температурах газа наилучшим фильтром является керамиковый фильтр, устанавливаемый на входном конце заборной трубки. Керамиковый фильтр (рис. 222) представ-

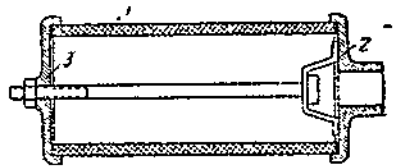


Рис. 222. Керамиковый фильтр:

1 — пористый шамотный цилиндр; *2* и *3* — крышки.

ляет собой отрезок цилиндрической трубы из пористой шамотной массы *1*, зажатый на асбестовых прокладках между двумя металлическими крышками *2* и *3*. Одна из крышек *2* имеет центральное нарезное отверстие для навинчивания на конец заборной трубы. Механические примеси газа откладываются на наружной поверхности фильтра, причем образующаяся корка, достигнув известной толщины, отваливается при сотрясениях. Керамиковый фильтр применяется для всех печных газов.

Слоевой фильтр (рис. 223) применяется для газов с невысокой температурой. В зависимости от температуры и свойств

газа слоевые фильтры наполняются гравием, коксом, древесной шерстью, опилками, ватой и т. п. Заполнение делается несколькими слоями из материала различной крупности. Нижние слои составляются из более крупного материала, а верхние из более мелкого. Например, первый слой кокс размером кусков 10—15 *мм*; второй слой мелкий кокс (7—10 *мм*); третий слой древесная шерсть; верхний слой опилки. Слоевые фильтры устанавливаются в высшей точке системы, чтобы обеспечить свободный сток конденсата в сборник.

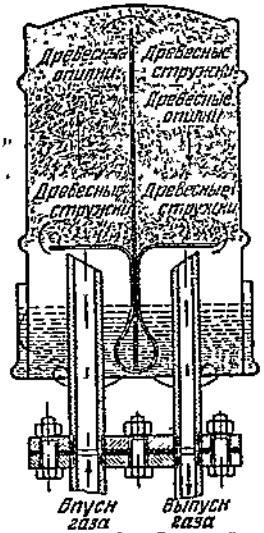
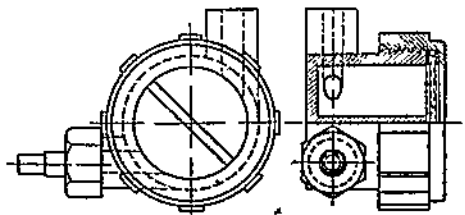


Рис. 223. Слоевой фильтр.


Рис. 224. Контрольный фильтр.

К слоевым фильтрам относится контрольный фильтр (рис. 224) со стеклянной ватой, устанавливаемый перед самым газоанализатором. Контрольный фильтр представляет собой цилиндрическую металлическую камеру с двумя патрубками для входа и выхода газа, наполненную стеклянной ватой. Торцевые стенки камеры стеклянные, позволяющие наблюдать за состоянием набивки фильтра.

Осушающий фильтр Моно. Фильтр (рис. 225) состоит из фильтрующей камеры *1*, заполненной стеклянной ватой, и сосудов *3* и *4*, заполненных серной кислотой. Сосуды *3* и *4* заключены в кожухе *2*. Газ через патрубок *8* проходит над поверхностью серной кислоты в сосуде *3* и затем сквозь слой стеклянной ваты в камере *1*. Осушенный и освобожденный от взвешенных частиц газ идет к газоанализатору. По мере увеличения объема серной кислоты в сосуде *3*, вследствие поглощения влаги, избыток ее по трубке *5* стекает в сосуд *4*, откуда периодически удаляется через горлышко *6*. На случай переполнения

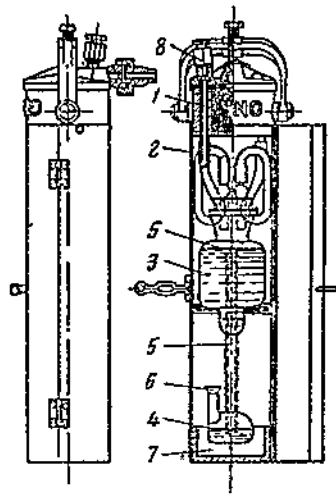


Рис. 225. Осушающий фильтр Моно:
1—фильтрующая камера; *2*—кожух; *3* и *4*—сосуды с серной кислотой; *5*—сливная трубка; *6*—горлышко сосуда; *7*—фарфоровая ванна; *8*—входной патрубок.

сосуда *4* кислотой под ним помещена фарфоровая или стеклянная ванна *7*, защищающая металлический кожух фильтра от действия кислоты.

Осушающий фильтр устанавливается у заборной трубки в тех случаях, когда соединительный трубопровод проходит по открытому пространству и есть опасность закупоривания соединительного трубопровода ледяными пробками в зимнее время.

Химические фильтры. Для удаления из газа вредных примесей: тяжелых углеводородов, сероводорода и других сернистых соединений, применяют фильтры, наполненные соответствующими веществами.

Тяжелые углеводороды необходимо удалять в тех случаях, когда какой-либо из компонентов газовой смеси определяется методом сожжения. Сероводород и другие сернистые соединения удаляются для предохранения металлических частей газоанализатора от коррозии, а катализатора дожигательной печи от отравления. Для удаления сернистых соединений применяется фильтрующая масса из древесных опилок с гидратом окиси железа.

Насосные и редукторные приборы. В случае забора газа с давлением выше атмосферного необходима установка регулятора давления. Регулятор устанавливается в конце соединительного трубопровода перед контрольным фильтром.

Газовый дроссель применяют для снижения давления газа в газопроводе и регулирования количества газа, поступающего к газоанализатору для уменьшения его расхода. Газовый дроссель устанавливается в начале линии после холодильника и механического фильтра.

Подвод к газоанализатору вспомогательного газа (водорода, кислорода) из баллонов производится через мано-детандер, мембранный регулятор давления и гидравлический предохранитель.

Забор газа, имеющего давление ниже атмосферного или малое давление, неспособное преодолеть сопротивление соединительной линии, производится при помощи эжектора или эксгаустера.

Чаще всего применяются водоструйные эжекторы, нередко составляющие неотъемлемую часть газоанализатора. Эксгаустеры применяются реже вследствие высокой стоимости и сложности устройства. Они весьма ценны в тех случаях, когда необходимо обеспечить полную невозможность подсоса воздуха в газопровод, так как создают в линии положительное давление.

Устройство для подачи воды. Подача воды к газоанализатору обычно производится непосредственно из водопроводной сети. Однако возможность колебаний напора в сети, вредно отражающаяся на работе прибора, и возможность перерыва подачи делают более целесообразным установку специального питательного водяного бачка.

Бачок рассчитывается не менее чем на получасовой запас воды, устанавливается на высоте 5—7 *м* над газоанализатором и снабжается поплавковым регулятором уровня и переливной трубкой для устранения случайного переполнения.

Расход воды в химических газоанализаторах составляет от 100 до 200 *л/час*.

Бачок должен устанавливаться в отапливаемом помещении, чтобы температура воды была более или менее постоянной в пределах от 10 до 40°.

Для подвода воды от бачка к анализатору применяют газовые трубки диаметром $^3/_8$—$^1/_2$" или латунные диаметром 10—12 *мм*.

49. Электрические газоанализаторы

Из многочисленных видов физических газоанализаторов наиболее широкое применение приобрели электрические газоанализаторы, действие которых основано на сравнении тепловых параметров газов: теплопроводности и теплоты реакции.

Электрический газоанализатор для определения содержания углекислоты в дымовых газах. Электрический газоанализатор Сименса на углекислоту в дымовых газах работает на основе сравнения теплопроводности воздуха и газовой смеси, содержащей углекислоту.

Теплопроводность различных газов приведена в табл. 15.

Дымовые газы содержат в основном азот и углекислоту и в небольших количествах кислород, окись углерода и иногда водород.

Данные табл. 15 показывают, что величины теплопроводности кислорода, азота и воздуха практически равны между собой, а теплопроводность окиси углерода настолько близка к теплопроводности воздуха, что в связи с малым содержанием окиси углерода в дымовых газах можно без заметной погрешности не учитывать разницы между ее теплопроводностью и теплопроводностью воздуха. В то же время теплопроводность углекислоты резко от них отличается. Эти обстоятельства благоприятствуют использованию этой величины для указанной цели.

Заметную ошибку может внести лишь содержание водорода, который имеет очень большую теплопроводность, в семь раз превышающую теплопроводность воздуха. Поэтому при содержании в дымовых газах водорода в сколько-нибудь заметных количествах ($>0{,}05\%$) необходимо применять особые методы, обеспечивающие верный результат анализа.

Схема устройства газоанализатора заключается в следующем. Две одинаковые платиновые проволоки, нагреваемые проходящим по ним электрическим током до одной и той же температуры, заключены в две одинаковые цилиндрические камеры. Если газовая среда, окружающая проволоки, в обеих камерах одна и та же, то тепловое состояние обеих проволок и их температуры будут одинаковы, так как условия теплового равновесия обеих проволок тождественны. Если же в одной из камер состав газовой среды изменится, то изменятся условия теплового равновесия, а с ними и температура проволоки в этой камере. Изменение температуры повлечет за собой изменение омического сопротивления проволоки, измеряя которое, можно судить об изменении состава газовой среды, окружающей проволоку.

Таблица 15

Относительная теплопроводность газов и паров (теплопроводность воздуха равна 1,00)

Наименование	Химическая формула	Температура °С	Теплопроводность
Азот	N_2	0	0,998
Аммиак	NH_3	0	0,897
Ацетилен	C_2H_2	0	0,776
Ацетон	C_3H_6O	0	0,405
Бензол	C_6H_6	0	0,370
Бромистый метил	CH_3Br	0	0,257
Водород	H_2	0	7,130
Водяной пар	H_2O	100	0,973
Воздух	—	0	1,000
Воздух	—	100	1,280
Гелий	He	0	6,238
Двуокись азота	NO_2	0	1,798
Закись азота	N_2O	0	0,646
Иодистый метил	CH_3J	0	0,194
Кислород	O_2	0	1,015
Метан	CH_4	0	1,318
Метилацетат	$C_3H_6O_2$	0	0,421
Метиловый спирт	CH_4O	0	0,592
Неон	Ne	0	1,991
Окись азота	NO	0	0,933
Окись углерода	CO	0	0,964
Сернистый ангидрид	SO_2	0	0,344
Сероводород	H_2S	0	0,538
Сероуглерод	CS_2	0	0,285
Углекислота	CO_2	0	0,614
Хлор	Cl_2	0	0,322
Хлористый метил	CH_3Cl	0	0,377
Хлористый метилен	CH_2Cl_2	0	0,276
Хлористый этил	C_2H_5Cl	0	0,391
Хлороформ	$CHCl_3$	0	0,278
Четыреххлористый углерод	CCl_4	100	0,283
Этан	C_2H_6	0	0,807
Этилацетат	$C_4H_8O_2$	100	0,539
Этилен	C_2H_4	0	0,735
Этиловый спирт	C_2H_6O	100	0,688
Этиловый эфир	$C_4H_{10}O$	0	0,543

Для измерения сопротивления в электрическом газоанализаторе применена схема моста Уитстона (рис. 226), четыре плеча которого имеют одинаковое сопротивление. Плечи моста выполнены из тонких платиновых проволок, две из которых, r_1 и r_3, помещены в камеры, наполненные воздухом, а две другие, r_2 и r_4, в камеры с исследуемым газом. Разность условий теплового равновесия создает изменение сопротивлений одной пары плеч относительно другой, и в диагонали моста возникает ток, величина которого пропорциональна изменению сопротивления.

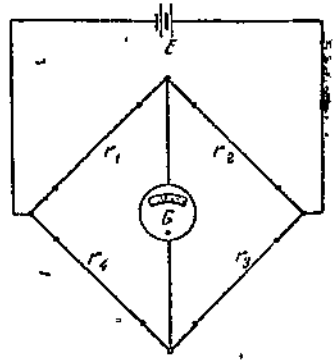


Рис. 226. Схема электрического газоанализатора.

r_1, r_3 — сопротивления в воздушных камерах; r_2, r_4 — сопротивления в газовых камерах; E — источник питания; G—гальванометр.

Обозначив величину сопротивления плеч r_1, r_2, r_3 и r_4 через R, изменение сопротивления плеч r_2 и r_4 через ΔR, сопротивление гальванометра, включенного в диагональ моста, через $R_г$ и силу тока, питающего мост, I_0, то сила тока, протекающего через гальванометр, будет (при ΔR малом по сравнению с R):

$$I_г = \frac{I_0}{2} \cdot \frac{\Delta R}{R + R_г}. \qquad (209)$$

Из уравнения (209) вытекает, что сила тока в гальванометре, а следовательно, чувствительность схемы тем больше, чем меньше сопротивление гальванометра. Поэтому в электрических газоанализаторах применяются только низкоомные измерительные приборы.

Из этого же уравнения (209) видно, что сила тока в гальванометре прямо зависит от силы тока, питающего схему, поэтому для возможности измерения изменения сопротивления необходимо обеспечить постоянство силы тока от источника питания. Это достигается наличием в схеме реостата и амперметра в цепи питания. При питании газоанализаторов от сети постоянство силы тока обеспечивается применением трансформаторов с насыщенным сердечником и барретеров.

Погрешности электрических газоанализаторов. Кроме погрешностей, вызываемых электрическими свойствами схемы, имеются погрешности, зависящие от тепловых, аэродинамических и физических причин.

Колебание температуры окружающей среды может вызвать заметную величину погрешности, так как в уравнение теплового равновесия входит как температура нитей, так и температура стенок камер.

Выражение зависимости силы тока в гальванометре от температур нитей и стенок камер имеет следующий вид:

$$I_г = k\,[(T_г - T'_г) - (T_в - T'_в)] = k\,[(T_г - T_в) - (T'_г - T'_в)], \qquad (210)$$

где $I_г$ — сила тока в гальванометре;
$T_г$, $T_в$ — температуры нитей в газовой и воздушной камерах;
$T'_г$, $T'_в$ — температуры стенок газовой и воздушной камер;
k — постоянная прибора.

Обозначив разность температур нитей:

$$T_г - T_в = \tau_н, \tag{211}$$

а разность температур стенок:

$$T'_г - T'_в = \tau_с, \tag{212}$$

получим:

$$J_2 = k\,(\tau_н - \tau_с). \tag{213}$$

Для нормальной работы прибора необходимо, чтобы $\tau_с = 0$.

Если $\tau_с \neq 0$, то абсолютная величина погрешности показаний прибора будет:

$$f_а = k\,\tau_с, \tag{214}$$

а относительная:

$$f_г = \frac{\tau_с}{\tau_н} 100. \tag{215}$$

Относительная величина погрешности может достичь значительной величины, так как разность температур нитей при содержании углекислоты до 20% составляет несколько градусов (максимально 8—10°). Поэтому разность температур стенок камер в 0,5° дает относительную погрешность в 5—6%.

Для уменьшения влияния этого фактора камеры для воздуха и газа выполняются в виде каналов, высверленных в одной массивной болванке из металла высокой теплопроводности (красная медь). Блок камер защищается кожухом от воздушных потоков и передачи тепла от соседних нагретых предметов.

Изменение скорости просасывания газа также теоретически должно сказаться на точности результатов, т. е. явиться источником погрешности. Однако подсчеты показывают, что количество тепла, уносимое газом из газовой камеры, составляет весьма малую долю тепла, выделяемого проволокой (0,8—1,5%). Таким образом, изменение скорости газа в практически возможных пределах не отражается сколько-нибудь заметно на результатах работы прибора.

Поскольку теплопроводность водяных паров (табл. 15) в 1,3 раза выше теплопроводности воздуха и в 2,2 раза выше теплопроводности углекислоты, колебания влажности как воздуха, так и газа могут заметно повлиять на результаты измерений. Соответственные расчеты показывают, что возникающая погрешность во много раз выше, если эталонный газ (воздух в воздушной камере) имеет постоянную абсолютную влажность или полностью осушен. В этом случае колебания температуры поступающего в прибор газа всего на 10°, при относительной влажности газа, равной 100%, могут вызвать относительную погрешность, составляющую около 10—15%, т. е. весьма сильно исказить результаты анализа.

Влияние колебания влажности может быть снижено до весьма небольшой величины насыщением влагой эталонного газа (воздуха) при температуре исследуемого газа.

Практически это можно выполнить пропусканием воздуха, поступающего в воздушную камеру газоанализатора, через водяной затвор, а затем через общий с газом холодильник для выравнивания температур газа и воздуха (рис. 227). Подобная установка может работать при соблюдении следующих двух условий:

1) Точка росы газа должна быть выше температуры воды в холодильнике.

2) Температура воздуха перед поступлением в холодильник должна быть выше температуры воды в холодильнике.

Однако это устройство весьма редко применяется на практике, так как значительно усложняет прибор, требуя установки добавочного эжектора для

воздуха. Поэтому обычно воздушная камера устраивается закрытой, наполненной осушенным воздухом, прибор же градуируется при определенной температуре газа стопроцентной относительной влажности.

Для получения верных результатов в эксплоатации необходимо следить за тем, чтобы температура газа, поступающего в прибор, как можно меньше отличалась от градуировочной температуры.

Конструкция датчика углекислоты газоанализатора представлена схематически на рис. 228. В металлическом кожухе *1* расположен медный массивный блок *2* с пятью параллельными

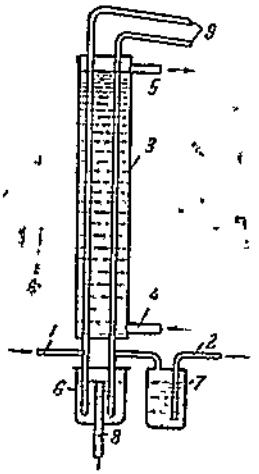


Рис. 227. Устройство для увлажнения воздуха:

1 — вход газа; *2* — вход воздуха; *3*—холодильник; *4* — вход охлаждающей воды; *5* — выход охлаждающей воды; *6*—сборник конденсата; *7*—водяной затвор; *8* — трубка для стока конденсата; *9*—трубки газа и воздуха к газоанализатору.

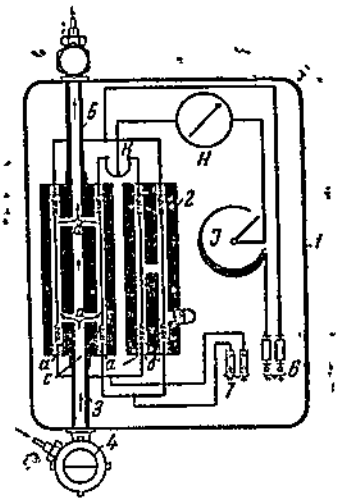


Рис. 228. Электрический газоанализатор. Датчик углекислоты:

1 — кожух; *2* — блок камер; *3* — соединительная трубка; *4* — контрольный фильтр; *5* — всасывающая трубка; *6*, *7* — клеммы; *a*, *b*, *c* и *d* — каналы; *H* — миллиамперметр; *I* — реостат; *K* — регулировочный потенциометр.

каналами *a*, *b*, *c*. В каналах *a* и *b* помещены по оси платиновые проволоки, поддерживаемые в натянутом состоянии платино-иридиевыми пружинками, укрепленными на концах проволок. Канал *c*, находящийся между двумя каналами *a* и соединенный с ними поперечными каналами *d*, служит для подачи исследуемого газа и соединен трубкой *3* с контрольным фильтром *4* и трубкой *5* с трубопроводом, ведущим к эжектору. Проволоки в каналах *a* и *b* соединены по схеме моста Уитстона, в одну диагональ которого включена питающая цепь с регулирующим силу тока реостатом *I* и миллиамперметром *H*. Присоединение питательного фидера к одной из вершин моста выполнено в виде потенциомет-

ра для точной регулировки равновесия моста. Клеммы *6* служат для присоединения источника питания.

Во вторую диагональ включается измерительный прибор, присоединяемый к клеммам *7*, шкала которого градуирована в процентах содержания углекислоты. К датчику, кроме указывающего прибора, может быть присоединен регистрирующий прибор и счетчик.

Сила тока, питающего прибор, составляет около 0,4 *а*. Температура нагрева проволок около 100°. Расход воды на эжектор до 200 *л/час*.

Газоанализатор для определения окиси углерода и водорода. Присутствие в дымовых газах окиси углерода и водорода свидетельствует о неполноте горения и, кроме того, отражается на точности определения углекислоты, поэтому определение этих двух компонентов дымовых газов представляется весьма важным.

Использование метода определения теплопроводности для определения суммы содержания $CO+H_2$ невозможно ввиду чрезвычайно большого различия величин теплопроводности этих газов. Для их определения применяется поэтому иной метод, основанный на измерении теплоты сгорания этих газов.

Газоанализатор, определяющий сумму содержания $CO + H_2$ (рис. 229), представляет мост Уитстона, две смежные ветви которого состоят из тонких платиновых проволок, обогреваемых током, заключенных в две камеры — воздушную и газовую.

При температуре нагрева проволок в пределах 400—450° окись углерода и водород сгорают в углекислоту и воду с выделением тепла по реакции:

$$2CO + O_2 = 2CO_2 + 134 \text{ ккал;} \qquad (216)$$

$$2H_2 + O_2 = 2H_2O + 137 \text{ ккал.} \qquad (217)$$

Вследствие выделения тепла температура проволоки, находящейся в газовой камере, повышается, сопротивление ее увеличивается, нарушая равновесие моста. Сила тока, появляющаяся при этом в диагонали моста, пропорциональна количеству выделившегося тепла, т. е. содержанию CO и H_2 в исследуемом газе, что дает возможность нанести на шкале гальванометра непосредственно величины, показывающие содержание этих компонентов в газовой смеси.

Конструктивная схема датчика газоанализатора на $CO + H_2$ представлена на рис. 230. Сила тока, питающего прибор, равна 0,8 *а* при 6 *в*.

Оба датчика на CO_2 и $CO+H_2$ обычно объединяются в одну систему так, что один и тот же поток газа просасывается последовательно через оба датчика, как это показано схематически на рис. 231.

Ввиду того что содержание кислорода в дымовых газах может оказаться недостаточным, к газу перед датчиком $CO + H_2$ подмешивается воздух, засасываемый в количестве около 30% через калиброванное сопло *L* (рис. 231).

- Монтаж электрических газоанализаторов. В комплект установки электрического газоанализатора, кроме описанных двух датчиков и указывающих или регистрирующих приборов, входят дополнительные устройства для очистки и охлаждения газа и для просасывания газа через систему датчиков.

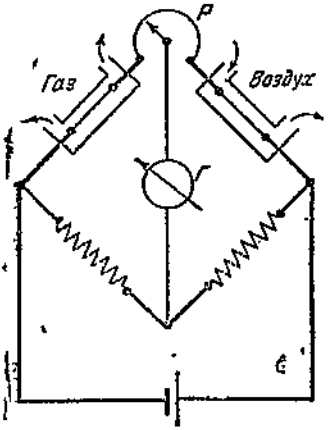


Рис. 229. Электрический газоанализатор. Схема датчика окиси углерода и водорода.

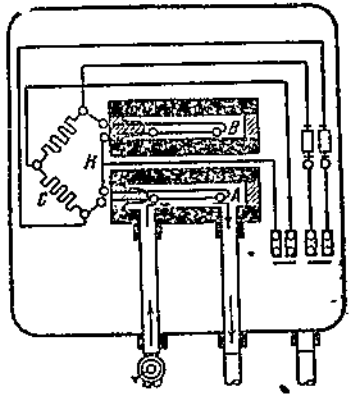


Рис. 230. Датчик окиси углерода и водорода электрического газоанализатора:

A — газовая камера; *B* — воздушная камера.

На рис. 232 изображена монтажная схема установки. Газ всасывается из газохода заборной трубкой через керамиковый фильтр *1* и проходит сперва через холодильник *3* для охлаждения и освобождения от избыточной влаги. Конденсат воды, выделившейся из газа в холодильнике, собирается в приемнике 2, удаляясь оттуда самотеком по мере накопления. Пройдя контрольный фильтр *4*, газ поступает в датчик углекислоты *5* и далее через регулирующий кран *6* в датчик $CO+H_2$ *7*. Выхлопная труба датчика *7* соединяется с водяным эжектором *8*, создающим разрежение около 30 *мм* вод. ст., обеспечивающим непрерывное просасывание газа через систему. Вода поступает в холодильник *3* по трубе *14* и из него идет по трубе *15* к эжектору *8*.

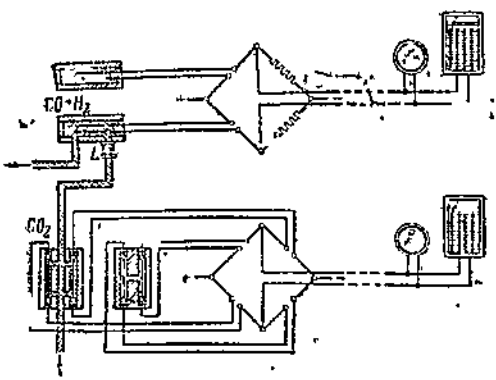


Рис. 231. Схема установки электрического газоанализатора:

L — сопло для подачи воздуха.

Датчики *5* и *7* соединены проводами с указывающими приборами *9* и *10* и общим регистрирующим прибором *13* на две кри-

вых. В измерительную сеть включены также счетчики *11* и *12*, суммирующие количества CO_2 и $CO+H_2$, прошедшие через датчики.

Провода, соединяющие датчики с измерительными приборами, — медные, сечением 1,5—2,5 *мм*². При длине соединительных проводов свыше 50 *м* напряжение источника питания необходимо увеличить.

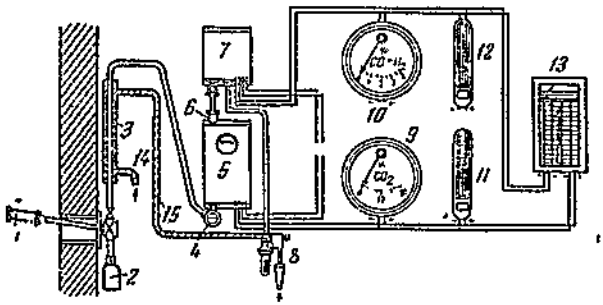


Рис. 232. Монтажная схема электрического газоанализатора:

1 — керамиковый фильтр; *2* — приемник конденсата; *3* — холодильник; *4* — контрольный фильтр; *5* — датчик CO_2; *6* — регулирующий кран; *7* — датчик CO и H_2; *8* — эжектор; *9* и *10* — указывающие приборы; *11*, *12* — счетчики; *13* — регистрирующий прибор; *14* — трубка для подачи воды на холодильник; *15* — трубка подачи воды к эжектору.

Во избежание запаздывания датчики следует устанавливать как можно ближе к месту забора газа; лучше всего устанавливать датчики на расстоянии 1 *м* от заборной трубки.

Кроме анализа дымовых газов электрические газоанализаторы могут применяться для:

определения чистоты водорода в производстве аммиака;

определения чистоты электролитического водорода;

определения чистоты азота в производстве аммиака;

анализа азото-водородной смеси;

анализа аммиачного газа после колонны синтеза;

определения содержания кислорода в азоте в цианамидном процессе;

определения чистоты кислорода и азота в производстве жидкого воздуха;

анализа газов колчеданных печей в сернокислотном производстве;

анализа паро-воздушных смесей, содержащих пары органических растворителей: ацетон, бензол, спирт и т. п.;

определения содержания кислорода и окиси углерода в газах цементных печей;

анализа газов известковообжигательных печей в содовом и сахарном производствах.

50. Механические газоанализаторы

Из чисто механических газоанализаторов заслуживает внимания аэродинамический газоанализатор Ренарекс, который основан на сравнении живой силы двух одинаковых газовых потоков, имеющих различные плотности. При равенстве скоростей и объемов потоков живая сила потоков будет прямо пропорциональна плотностям обоих потоков.

Плотности отдельных компонентов дымовых газов приведены в табл. 16.

Таблица 16

Плотность составных частей дымовых газов

Наименование газа	Плотность газов при 760 *мм* рт. ст. и 0°, *кг/м*³	Относительная плотность газов (плотность воздуха равна 1,0)
Воздух сухой	1,293	1,000
Азот	1,251	0,967
Кислород	1,429	1,110
Окись углерода	1,251	0,967
Углекислота	1,964	1,519
Сернистый ангидрид	2,860	2,212
Водяной пар	0,804	0,622
Метан	0,715	0,553
Водород	0,089	0,069

Плотность углекислоты более чем в полтора раза выше всех газов, входящих в состав дымовых газов, за исключением водяных паров, легко удаляемых конденсацией, сернистого ангидрида, водорода и метана. Сколько-нибудь значительное содержание этих веществ в дымовых газах недопустимо, так как вводит большую погрешность в показания аэродинамического газоанализатора.

Принципиальная схема газоанализатора Ренарекс изображена на рис. 233. Прибор состоит из двух одинаковых крыльчатых колес *I* и *II*, жестко закрепленных на осях *1* и *2*. На эти же оси *1* и *2* насажены неподвижно рычаги *3* и *4*, концы которых шарнирно соединены тягой *5*, образуя шарнирный четырехзвенник.

К оси *2* тоже жестко прикреплена указывающая стрелка *6*, движущаяся по дугообразной шкале *7*. Против каждого колеса *I* и *II* расположены два других крыльчатых колеса *III* и *IV*, так что плоскости их параллельны плоскостям колес *I* и *II*. Вторая пара колес вращается с одинаковой скоростью, но в разные стороны электромотором через ременную передачу.

Газовые вихревые потоки, создаваемые парой колес *III* и *IV*, играющих роль вентиляторов, направляются на крыльчатые коле-

са *I* и *II*, стремясь увлечь их во вращение. Ввиду противоположного направления обоих потоков к тяге *5* (рис. 234,*а*) прикладываются силы F_1 и F_2, направленные в противоположные стороны, действующие на плечи равной длины: $a_1 = a_2 = l \cos \alpha$, где *l*—длина рычагов *3* и *4*, а α —угол, образуемый осью рычагов с нормалью к линии $O_1—O_2$, проходящей через центры осей крыльчаток.

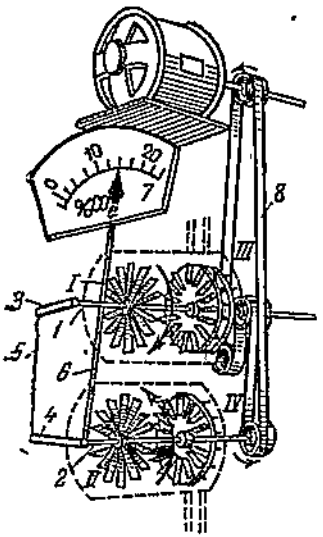


Рис. 233. Схема устройства газоанализатора Ренарекс:
I — газовое колесо; *II* — воздушное колесо; *III* — газовый вентилятор; *IV* — воздушный вентилятор; *1* — ось газового колеса; *2* — ось воздушного колеса; *3* и *4* — рычаги; *5* — связывающая тяга; *6*—указательная стрелка; *7*—шкала; *8* — приводной ремень.

При равенстве живых сил обоих потоков силы F_1 и F_2 будут равны и вращающие моменты обеих сил, действующие на оси *1* и *2* при равенстве плеч a_1 и a_2, будут также равны и система четырехзвенника останется в равновесии.

Если на один из вентиляторов будет поступать газ большей плотности, то живая сила потока этого газа будет боль-

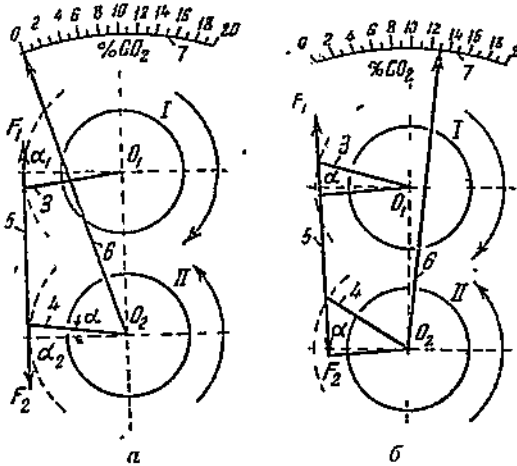


Рис. 234. Схема работы газоанализатора Ренарекс:
I и *II* — воспринимающие колеса; *1* и *2* — оси колес; *3* и *4* — рычаги; *5* — тяга; *6* — указывающая стрелка; *7* — шкала.

ше живой силы потока другого вентилятора. Допустим, что живая сила потока, поступающего на колесо *I*, больше живой силы потока колеса *II*. Тогда сила F_1 станет больше силы F_2 и момент этой силы также будет больше момента силы F_2. Под влиянием разности моментов обеих сил шарнирный четырехзвенник начнет поворачиваться вокруг неподвижных шарниров O_1 и O_2 в направлении по часовой стрелке. Но одновременно величина плеч a_1 и a_2 станет изменяться; плечо a_1, на которое действует сила F_2, будет увеличиваться, а плечо a_2, на которое действует сила F_1, будет уменьшаться (рис. 234,*б*).

При повороте на некоторый угол β система придет в равновесие в тот момент, когда будет выполнено соотношение:

$$F_1 \cos(\alpha + \beta) = F_2 \cos(\alpha - \beta). \qquad (218)$$

Поворот четырехзвенника на угол β вызовет поворот на тот же угол стрелки *6*.

Поскольку, как указано ранее, живая сила потока прямо пропорциональна плотности газа, а угол поворота прямо пропорционален разности живых сил, то угол отклонения стрелки будет прямо пропорционален разности плотностей обоих потоков или содержанию углекислоты в исследуемом газе.

В газоанализаторе Ренарекс один из вентиляторов создает воздушный поток постоянной влажности, а второй вентилятор — поток исследуемого газа также постоянной влажности.

На рис. 235 дана монтажная схема установки газоанализатора Ренарекс. Газ из газохода по заборной трубке *1* ($d = 25$ *мм*) поступает в стояк *2*, где охлаждается. Сконденсировавшаяся вода стекает по стояку в гидравлический затвор *6*, откуда удаляется самотеком по мере накопления. Из стояка газ проходит через слоевой фильтр *3*, наполненный древесной шерстью и опилками, и по трубам *4* и *5* через трехходовой кран *7* в газовую камеру прибора *8*, откуда возвращается по трубе *11* ($d = 19$ *мм*) обратно в газоход. В воздушной камере прибора *9* циркулирует замкнутый поток воздуха, проходящего на своем пути над поверхностью воды

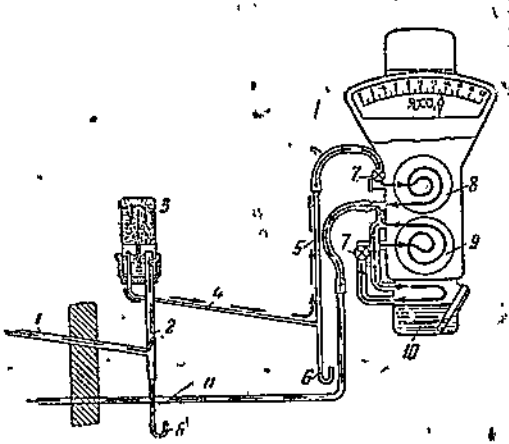


Рис. 235. Монтажная схема газоанализатора Ренарекс:

1 — заборная трубка; *2* — стояк; *3* — слоевой фильтр; *4* и *5* — соединительные трубки; *6* — гидравлические затворы; *7* — трехходовые краны; *8* — газовая камера; *9* — воздушная камера; *10* — увлажнитель; *11* — выхлопная труба.

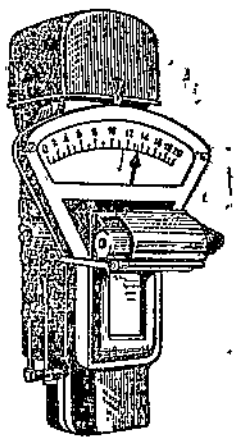


Рис. 236. Внешний вид газоанализатора Ренарекс.

увлажнителя *10* для поддержания постоянной степени насыщения влагой.

На стояке *5* также установлен гидравлический затвор *6* для удаления влаги, сконденсировавшейся на пути газа от фильтра до стояка *5* и в самом стояке.

Прибор снабжен регистрирующим приспособлением, отмечающим проколами на бумажной ленте изменение содержания углекислоты в газах.

На рис. 236 изображен внешний вид газоанализатора Ренарекс.

Электрические и механические газоанализаторы выгодно отличаются от обычных химических непрерывностью определений и меньшим запаздыванием показаний, что очень существенно в случаях быстрых, кратковременных колебаний состава газа.

Газоанализатор Ренарекс менее чувствителен к условиям работы и уходу, чем химические и электрические газоанализаторы, и поэтому может быть рекомендован также для небольших установок, не обладающих квалифицированным персоналом для обслуживания измерительных приборов.

ГЛАВА XII

КИСЛОТО- И СОЛЕМЕРЫ

51. Кондуктометрические измерения

Общие сведения. Приборы этой группы предназначены для определения концентрации электролитов в растворах и концентрации водородных ионов (pH) растворов. Работа первых заключается в измерении электропроводности жидкости; эти приборы носят общее название кондуктометров. Работа вторых (определителей pH) сводится к измерению электрических потенциалов; приборы носят название потенциометров.

Кондуктометрия и потенциометрия, внедрившиеся в промышленную практику в самое последнее время, представляют огромный интерес с точки зрения задач контроля производства и имеют широкие перспективы развития.

В настоящее время число промышленных типов приборов не велико, но оно увеличивается с каждым днем, совершенствуясь и принципиально и конструктивно.

Кондуктометры. Электропроводность растворов, так же как и электропроводность вообще, есть величина, обратная электрическому сопротивлению, и выражается в обратных омах $\gamma = ом^{-1}$ или сименсах.

Электропроводность раствора определяется концентрацией растворенного вещества, степенью его диссоциации, химической природой вещества и температурой раствора.

Электрическое сопротивление проводника, как известно, выражается зависимостью:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{F}, \qquad (219)$$

где R — электрическое сопротивление в омах;

ρ — удельное сопротивление, т. е. сопротивление проводника длиной 1 *см* и площадью сечения 1 *см*^{2};

l — длина проводника в *см*;

F — площадь сечения проводника в *см*^{2}.

Удельная электропроводность проводника:

$$\mu = \frac{1}{\rho} = \rho^{-1},$$

откуда $\rho = \frac{1}{\mu}$. Подставляя это значение в формулу (219), можно выразить величину удельной электропроводности в зависимости от сопротивления и размеров проводника:

$$\mu = \frac{l}{RF}. \qquad (220)$$

Чтобы иметь возможность сравнивать растворы различных веществ по их электропроводности, необходимо относить величину электропроводности к эквивалентной концентрации вещества и ввести понятие о эквивалентной электропроводности.

Удельная электропроводность, эквивалентная концентрация и эквивалентная электропроводность растворов связываются по Кольраушу следующей зависимостью:

$$\lambda = \frac{\mu}{c}, \qquad (221)$$

где λ — эквивалентная электропроводность;
μ — удельная электропроводность;
c — эквивалентная концентрация, выраженная числом грамм-эквивалентов вещества в 1 *мл* раствора.

Если заменить эквивалентную концентрацию понятием эквивалентного разбавления $v = \frac{1}{c}$, то зависимость (221) запишется в форме:

$$\lambda = \mu v. \qquad (222)$$

Для всех электролитных растворов эквивалентная электропроводность растет с разбавлением вследствие увеличения степени диссоциации электролита на ионы. Предельное значение γ может быть достигнуто при полной диссоциации.

В табл. 17 приведены значения эквивалентной электропроводности (по Кольраушу) для некоторых электролитов и различной концентрации их в растворе при температуре 18°.

Таблица 17

Эквивалентная электропроводность некоторых электролитов при 18°

c *г-экв/л*	KCl	NaCl	KNO_3	$AgNO_3$	$\frac{1}{2}CuSO_4$	$\frac{1}{2}H_2SO_4$	HCl	CH_3CO_2H	KOH	NH_3
0,0001	129,1	108,1	125,5	115,0	110,0	—	—	107,0	—	65,0
0,0005	128,1	107,2	124,4	113,9	103,5	—	—	57,0	—	38,0
0,001	127,3	106,5	123,6	113,2	98,5	361,00	377,0	41,0	234,0	28,0
0,005	124,4	103,8	120,5	110,0	81,0	330,0	373,0	20,0	230,0	13,2
0,01	122,4	102,0	118,2	107,8	71,7	308,0	370,0	14,3	228,0	9,6
0,05	115,8	95,7	109,9	99,5	51,2	253,0	360,0	6,48	219,0	4,6
0,1	112,0	92,0	104,8	94,3	43,9	225,0	351,0	4,60	213,0	3,3
0,5	102,4	80,9	89,2	77,8	—	205,0	327,0	2,01	197,0	1,35
1,0	98,3	74,3	80,5	67,8	—	198,0	301,0	1,32	184,0	0,89
2,0	92,6	64,8	79,4	55,8	—	183,0	254,0	0,80	160,0	0,53

Величина электропроводности растворов, так же как и других проводников, зависит от температуры их. В отличие от металлических проводни-

ков, где электропроводность уменьшается с повышением температуры, электропроводность растворов при этих условиях увеличивается.

В пределах концентрации от 0,0001 до 0,05 *г-экв/л* электропроводность растворов с повышением температуры повышается согласно следующему уравнению:

$$\mu_t = \mu_{18}\,[1 + a\,(t - 18) + b\,(t - 18)^2], \qquad (223)$$

где μ_t — удельная электропроводность при температуре $t°$;
μ_{18} — удельная электропроводность при 18°;
a и b — температурные коэфициенты, связанные между собой зависимостью:

$$b = 0{,}163\ (a - 0{,}0174). \qquad (224)$$

Для ряда электролитов при концентрации 0,001 *г-экв/л* в интервале температур 0—30° численное значение температурных коэфициентов a и b по данным Кольрауша приведено в табл. 18.

Таблица 18

Температурные коэфициенты электропроводности

Вещество	$a \cdot 10^4$	$b \cdot 10^4$	Вещество	$a \cdot 10^4$	$b \cdot 10^4$
Na_2CO_3	261	14,18	$NaNO_3$	220	7,50
$MgSO_4$	238	10,43	KCl	217	7,01
Na_2SO_4	233	9,62	KOH	190	2,61
$MgCl_2$	232	9,45	H_3PO_4	169	—0,82
$CaCl_2$	229	8,97	H_2SO_4	165	—1,47
NaCl	226	8,48	HNO_3	165	—1,47
$BaCl_2$	225	8,31	HCl	164	—1,63
K_2SO_4	222	7,82	—	—	—

Из уравнения (223) можно установить, что электропроводность растворов веществ, указанных в табл. 18, изменяется на 1,5—2,5% при изменении температуры на 1°, что является весьма большой погрешностью. Для других концентраций и других веществ температурные изменения электропроводности могут быть в несколько раз больше.

Основные методы измерения электропроводности. Классический метод измерения сопротивления с помощью моста Уитстона является и в кондуктометрических измерениях наиболее применимым с тем отличием, что при определении величины сопротивления растворов приходится применить для питания моста переменный ток, чтобы избежать явлений поляризации электродов и связанных с ними крупных погрешностей измерения.

Схема измерительного моста переменного тока, предложенная Кольраушем, представлена на рис. 237. Мост состоит из магазина сопротивлений R, реохорда AB длиной 1000 *мм*, электродного сосуда с испытуемой жидкостью x. Питание осуществляется от индукционной катушки K с прерывателем P. В диагональ моста включен телефон T, присоединенный к движку реохорда D.

Равновесие моста устанавливается перемещением движка по реохорду по исчезновению звука в телефоне при замыкании ключа S.

При равновесии моста будет иметь место соотношение:

$$\frac{x}{r_2} = \frac{R}{r_4}, \qquad (225)$$

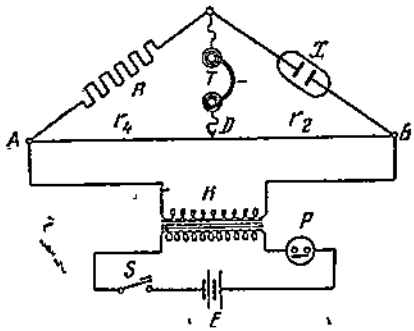


Рис. 237. Схема мостика Кольрауша: AB — реохорд; D — движок реохорда; R — магазин сопротивлений; x — электродный сосуд; K — индукционная катушка; P — прерыватель; T — телефон; S — ключ.

где x — сопротивление жидкости;
R — сопротивление магазина;
r_2 — сопротивление ветви реохорда DB;
r_4 — сопротивление ветви реохорда AD.

Обозначая r_4 через r, а r_2 через $(1000-r)$, получим из уравнения (225):

$$x = \frac{R(1000-r)}{r}, \qquad (226)$$

откуда электропроводность раствора будет:

$$\gamma = \frac{r}{R(1000-r)}, \qquad (227)$$

а удельная электропроводность:

$$\mu = k\gamma = \frac{kr}{R(1000-r)}. \qquad (228)$$

Коэфициент k является постоянной величиной для данного электродного сосуда. Он зависит от площади электродов, расстояния между ними и формы сосуда.

Зная величину k для данного сосуда и измерив электропроводность раствора, можно по уравнению (228) получить значение удельной электропроводности.

Промышленная измерительная техника кондуктометрии широко использует, кроме схемы Кольрауша, два основных метода: метод неравновесного моста с электродинамическими измерительными приборами и метод непосредственного измерения силы тока, проходящего через измерительный сосуд с раствором.

Оба эти метода менее точны, чем метод Кольрауша, но зато дают возможность отсчета концентрации непосредственно на шкале прибора, регистрации показаний и телепередачи их.

Применение в качестве измерительных приборов логометров переменного тока в значительной степени освобождает установку от влияния колебаний напряжения питающего тока, но вызывает повышение расхода энергии и вносит иногда помехи от поляризации.

Наиболее важной остается задача температурной компенсации, так как электропроводность быстро растет с повышением температуры. Все современные автоматические кондуктометры снабжены приспособлениями для компенсации изменений температуры, однако полностью этот вопрос не разрешен.

Солемер Гейгера и Шмидта. Схема солемера Гейгера и Шмидта представлена на рис. 238. В основу схемы принят мостовой метод, а в качестве измерительного прибора логометр переменного тока Гейгера.

Прибор состоит из электродного сосуда *I*, в котором помещены электроды R_1 и термометр сопротивления R_3, и логометра Гейгера *II* с тремя парами катушек: a_1 и a_2, b_1 и b_2, c_1 и c_2. Система питается переменным током от сети через понизительный трансформатор *III*, понижающий напряжение до 8 *в*.

Цепь правого электрода R_1 разделяется на две параллельные ветви. По одной ветви ток проходит через постоянное манганиновое сопротивление R_2 и последовательно в катушку логометра b_2; по другой ветви ток последовательно проходит через термометр сопротивления, выполненный из материала с высоким температурным коэфициентом, и катушку логометра b_1.

Магнитные поля катушек b_1 и b_2 направлены в противоположные стороны. Их результирующее влияние на сердечник зависит от температуры и компенсирует ее изменение. Катушки a_1 и a_2 питаются непосредственно от трансформатора, имеют также противоположно направленные магнитные поля и служат для повышения чувствительности логометра. В цепь катушек a_1 и a_2 включены манганиновые сопротивления R_4 и R_5, служащие для первоначальной регулировки прибора.

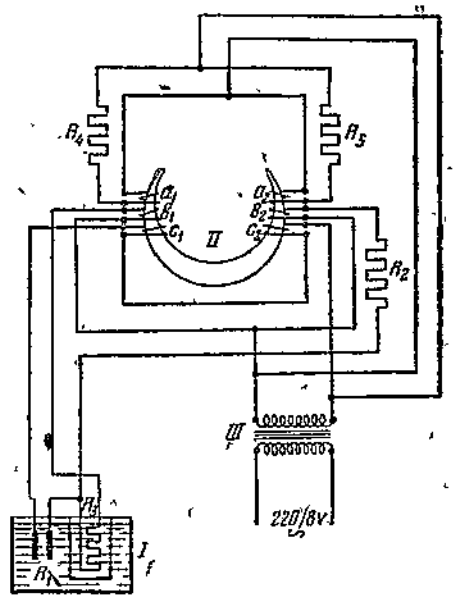


Рис. 238. Схема солемера Гейгера и Шмидта:

I — электродный сосуд; *II* — логометр Гейгера; *III* — понизительный трансформатор; a_1 и a_2 — катушки для повышения чувствительности логометра; b_1 и b_2 — компенсационные катушки; c_1 и c_2 — управляющие катушки; R_1 — электроды; R_2 — постоянное сопротивление; R_3 — термометр сопротивления; R_4 и R_5 — регулировочные сопротивления.

Третья пара катушек, c_1 и c_2, включена последовательно в цепь электродов R_1. Магнитные поля катушек c_1 и c_2 также противоположны по направлению. Результирующее магнитное поле, создаваемое действием полей катушек a_1 и a_2, c_1 и c_2, вызывает вращающий момент, поворачивающий сердечник и соединенную с ним стрелку. Влияние изменения температуры на угол поворота сердечника уничтожается действием катушек b_1 и b_2. Соответ-

ственным подбором величин самоиндукций катушек логометра и сопротивлений R_2 и R_3 удается получить удовлетворительную компенсацию влияния изменения температуры в интервале ± 10°.



Рис. 239. Кривые температурной компенсации солемера Гейгера и Шмидта.

Кривая температурных погрешностей для растворов поваренной соли концентраций от 0 до 100 *мг/л* приведена на рис. 239.

В солемерах Гейгера и Шмидта применяются или «погружные» электроды для установки на трубопроводе, или «проточные», через которые протекает часть потока жидкости. Погружные электроды имеют отдельный термометр сопротивления, ввертываемый в трубопровод вблизи электродов; в проточных электродах термометр сопротивления вмонтирован в центральный электрод, играющий роль гильзы термометра.

Солемер Сименса и Гальске. В солемере Сименса и Гальске температурная компенсация также основана на применении термометра сопротивления. Принципиальная схема прибора изображена на рис. 240. В одно из плеч моста Уитстона включен термометр сопротивления b. Электроды e, погруженные в исследуемый раствор, включены параллельно постоянному манганиновому сопротивлению f в цепь питания мостика от трансформатора h_2.

Сопротивление R электродного сосуда e выбирается бо́льшим по сравнению с постоянным сопротивлением f. При постоянстве напряжения источника питания I сила тока в мостике I практически будет пропорциональна сопротивлению R, т. е. можно написать:

$$I = c_1 R^{-1}. \qquad (229)$$

Сила тока i_g в диагонали неравновесного мостика будет зависеть от соотношения сопротивления a и b, а так как величина сопротивления b зависит от температуры и при температуре градуировки равна a, для силы тока i_g будет справедлива зависимость:

$$i_g = c_2 I(a - t) \qquad (230)$$

или, подставляя значение I из уравнения (229), можем написать:

$$i_g = c_1 c_2 R^{-1}(a - t). \qquad (231)$$

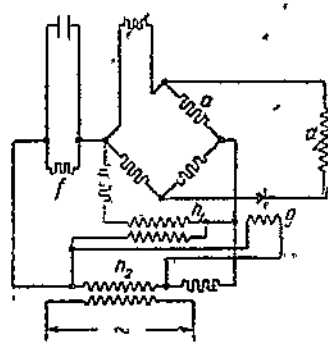


Рис. 240. Схема солемера Сименса и Гальске:

a, b — плечи мостика Уитстона; e — электродный сосуд; f — постоянное манганиновое сопротивление; g — механический вибрационный выпрямитель; h_1 — трансформатор корректировочный; h_2 — трансформатор питания; d — реостат.

Таким образом, сила тока в диагонали моста пропорциональна электропроводности и исправлена за температуру.

Для получения более крупных делений в начале шкалы, где главный ток питания течет почти полностью через сопротивление f, в цепь питания

ходается некоторый противоток от трансформатора h_1. В качестве измерительного прибора применяется гальванометр Депре д'Арсонваля, ток в который подается через механический вибрационный выпрямитель g. Гальванометры применяются указывающие, регистрирующие и контактные.

Удовлетворительная температурная компенсация в этом солемере лежит в пределах 30—80°.

Прибор предназначен для контроля питательной воды и конденсата в пределах концентраций 0—30 *мг/л*, но для других целей пределы шкалы могут быть увеличены до концентраций 500—5000 *мг/л*.

В солемерах Сименса применяются так называемые клеточные электроды погружного и проточного типа.

Электроды представляют собой два концентрических металлических цилиндра, из которых наружный имеет ряд щелей по образующим. Внутренний

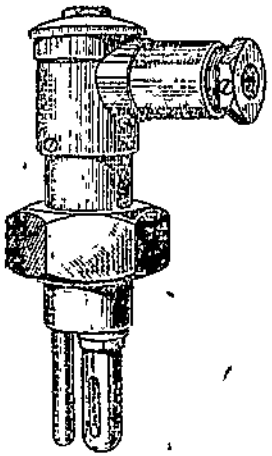


Рис. 241. Клеточный погружной электрод.

электрод выполнен из сплошного металлического стержня, изолированного от наружного электрода фарфоровой втулкой. В проточном типе электродная пара помещается в специальную камеру, через которую протекает ответвленная часть потока; электрод погружного типа (рис. 241) ввертывается непосредственно в стенку трубопровода. Левая гильза, видная на рис. 241, принадлежит термометру сопротивления.

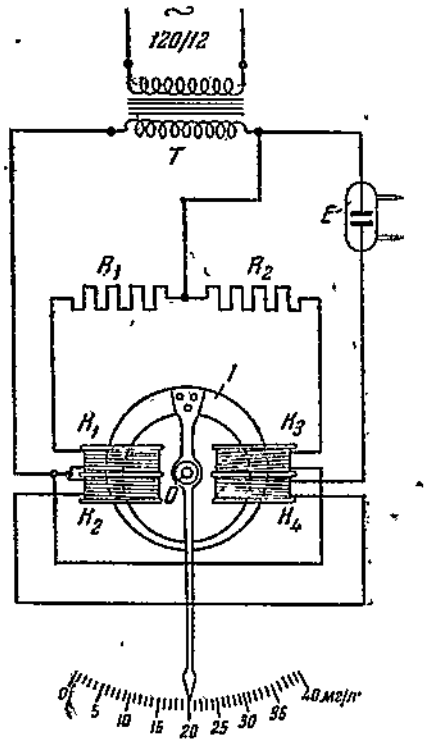


Рис. 242. Схема солемера ЦЛЭММ:

I — сердечник; K_1 и K_3 — катушки возбуждения; K_2 и K_4 — катушки электродового сосуда; R_1 и R_2 — постоянные манганиновые сопротивления; E — электродный сосуд; T — трансформатор питания; O — ось вращения сердечника.

Солемер системы ЦЛЭММ. Прибор центральной лаборатории и экспериментальных мастерских Мосэнерго построен по принципу логометра Гейгера. Принципиальная схема его изображена на рис. 242. Плоский серпообразный сердечник I помещен внутри двух пар катушек: K_1 и K_3, K_2 и K_4. Магнитные поля катушек K_1 и K_3, включенных в цепь трансформатора T параллельно, регулируются постоянными манганиновыми сопротив-

лениями R_1 и R_2 так, что при выключении второй пары катушек K_2 и K_4 стрелка прибора становится на нуль. Вторая пара катушек K_2, K_4 включена последовательно между собой и электродным сосудом E.

Магнитные поля катушек K_1 и K_3 складываются, а магнитные поля K_2 и K_4 вычитаются. Результирующий поток обеих пар катушек поворачивает сердечник со стрелкой вокруг оси O_1 до нового положения равновесия.

Особый интерес представляет система температурной компенсации, состоящая в изменении расстояния между электродами по мере изменения температуры так, чтобы увеличение сопротивления от увеличения расстояния точно соответствовало уменьшению сопротивления от повышения температуры. Осуществляется это закреплением одного из электродов на биметаллической пластинке, изгиб которой от изменения температуры раздвигает или сдвигает электроды.

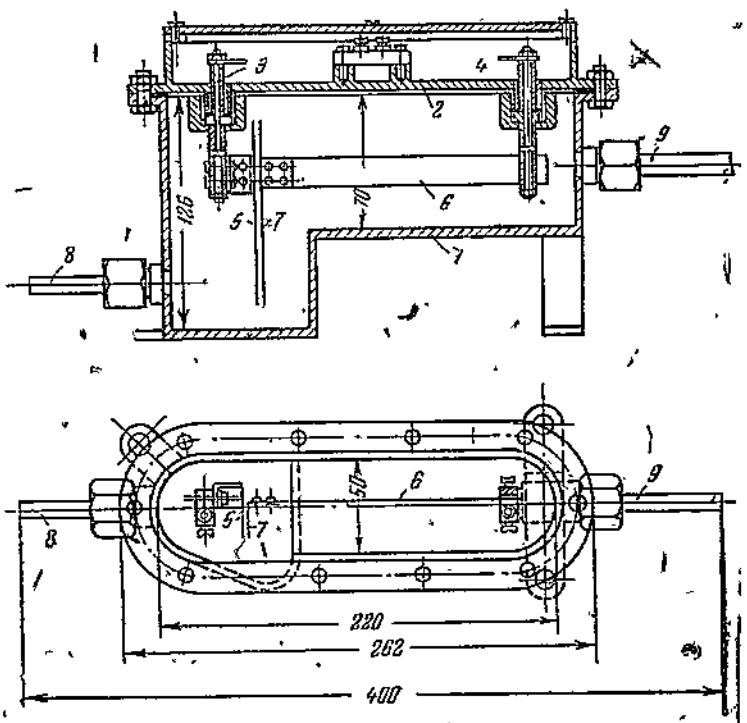


Рис. 243. Проточный электродный сосуд ЦЛЭММ:

1 — сосуд; *2* — крышка; *3* и *4* — контактные стержни; *5* и *7* — пластинчатые электроды; *6* — биметаллический держатель; *8* — входной штуцер; *9* — выходной штуцер.

На рис. 243 изображен один из типов проточных электродных сосудов ЦЛЭММ. Металлический сосуд *1* емкостью 0,9 *л*, эмалированный внутри, закрывается такой же эмалированной крышкой *2*, сквозь которую

проходят контактные стержни *3* и *4*, изолированные фарфоровыми втулками. К стержню *3* прикреплен один из электродов *5*, имеющий вид прямоугольной пластинки из нержавеющей стали; к стержню *4* прикреплен биметаллический пластинчатый держатель *6*, несущий на другом конце второй электрод *7*.

Исследуемый раствор входит через штуцер *8* снизу сосуда и выходит сверху через штуцер *9*, омывая биметаллический держатель и электроды. Изгиб биметаллического держателя при повышении температуры раздвигает электроды *6* и *7*, компенсируя увеличение электропроводности.

На рис. 244 изображены кривые, характеризующие точность температурной компенсации, достигнутую этим прибором.

Из диаграммы видно, что в пределах температуры 20—70° и концентраций от 0 до 10 *мг/л* прибор практически работает без погрешностей.

При сравнении показаний прибора с аналитическими данными в лабораторных условиях прибор дал величину погрешности не выше ± 0,2 *мг/л*. В эксплоатационных условиях погрешность прибора составляет не более ± 0,5 *мг/л*.

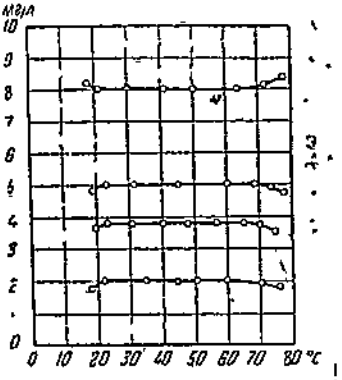


Рис. 244. Кривые температурной компенсации солемера ЦЛЭММ.

53. Измерение концентрации водородных ионов

В химической и родственных ей отраслях промышленности ход реакций в жидкостях часто зависит от степени щелочности или кислотности среды, т. е. от величины концентрации водородных ионов. Определение концентрации водородных ионов или числа pH до недавнего времени являлось чисто лабораторным экспериментом и лишь в последние годы стало возможным перенести этот метод в промышленную практику.

Показателем концентрации водородных ионов в растворе служит число pH, связанное с концентрацией водородных ионов C_{H^+} следующим соотношением:

$$pH = -\lg C_{H^+}. \qquad (232)$$

Появление водородных ионов в растворе обязано диссоциации части молекул воды, распадающихся на ионы H^+ и OH^-.

Произведение концентрации водородных и гидроксильных ионов является постоянным числом:

$$C_{H^+} \cdot C_{OH^-} = k = 10^{-14} \text{ (при } 22°). \qquad (233)$$

Это соотношение является основой для создания шкалы чисел pH.

Если $C_{H^+} = C_{O^-}$, то жидкость нейтральна. Тогда,

$$C_{H^+} = 10^{-7} \qquad (234)$$

или

$$pH = 7. \qquad (235)$$

В кислых растворах концентрация водородных ионов больше и число pH становится меньше 7. Чем меньше число pH, тем больше кислотность жидкости. В щелочных средах концентрация водородных ионов убывает, а число pH возрастает тем больше, чем больше степень щелочности.

Степенная зависимость между концентрацией водородных ионов и числом pH вызывает то, что вблизи нейтральной точки незначительное изменение кислотности или щелочности влечет за собой очень большое изменение числа pH.

Методы определения числа pH. Известны две группы методов определения числа pH: колориметрические и электрометрические.

Колориметрические методы основаны на свойствах некоторых красящих веществ изменять свои цвета в соответствии с концентрацией водородных ионов. Колориметрические методы в промышленной измерительной технике в настоящее время не имеют применения и остаются достоянием лабораторного анализа.

Электрометрические методы основаны на измерении величины электрического потенциала специальных электродов, помещенных в испытуемый раствор.

Так как измерить потенциал одиночного электрода невозможно, то применяют два различных электрода, измеряя получающуюся разность потенциалов. Измеренная разность потенциалов является мерилом для определения концентрации ионов.

По Нернсту разность потенциалов, развиваемая подобным гальваническим элементом, выражается уравнением:

$$e = e_0 + kT \lg C_x, \qquad (236)$$

где e — напряжение между электродами в вольтах;

e_0 — постоянная величина, зависящая от природы применяемых электродов;

k — постоянный коэфициент;

T — абсолютная температура в °К;

C_x — концентрация измеряемых ионов в *г-ион/л*.

Для водородных ионов при 20° уравнение (236) примет вид:

$$e = e_0 - 0{,}058\ \text{pH}. \qquad (237)$$

Из последнего уравнения следует, что напряжение электродной цепи линейно зависит от числа pH и что при 20° напряжение на каждую единицу pH изменяется на 58 *мв*.

Виды электродов. Для определения числа pH применяются платино-водородный, хингидронный, сурьмяный и стеклянный электроды.

Платино-водородный электрод — стандартный электрод для лабораторных исследований, не имеет никакого значения для промышленного определения числа pH.

Хингидронный электрод применяется в паре с платиновым электродом и самостоятельно в лабораторных исследо-

вайиях. Для промышленного применения в автоматических установках не удобен.

Сурьмяный электрод представляет собой стержень из металлической сурьмы, покрытый слоем окиси сурьмы. Сурьмяный электрод один из основных для производственных измерений. Прочность электрода и значительная сила тока позволяют применять простые измерительные устройства. Сурьмяный электрод дает неточные показания в сильно восстановительных или окислительных средах. Не применим в средах, содержащих ионы хлора.

Стеклянный электрод может считаться универсальным по широте применения. Действие его основано на возникновении электрического потенциала на поверхности тонкой стеклянной мембраны в прямой зависимости от числа pH жидкости, в которую погружена мембрана. Так как стекло неактивно по отношению к большинству химических реагентов, стеклянный электрод может применяться для самых разнообразных растворов, давая точные результаты измерений.

Стеклянный электрод выполняется в различных формах. В основном он представляет собой тонкую стеклянную мембрану шаровой или цилиндрической формы. Толщина ее колеблется от 0,1 до 0,001 *мм*. Чем тоньше мембрана, тем выше ее измерительное достоинство. Отвод потенциала с внутренней стороны мембраны электрода осуществляется при помощи наполняющей электрод жидкости с известной концентрацией ионов, или при помощи металлической обкладки, отводящей потенциал непосредственно.

Крайняя хрупкость тонких стеклянных мембран долгое время препятствовала введению стеклянных электродов в производственную практику. В настоящее время удалось создать стеклянные электроды, пригодные для промышленных измерений.

В качестве электрода сравнения в технических измерениях применяют почти исключительно каломельный электрод, обладающий постоянством потенциала и малым температурным коэфициентом.

Для устранения влияния исследуемой жидкости на электрод сравнения последний помещают в пористый сосуд, наполненный защитным раствором хлористого калия.

Электроды для технических промышленных измерений. Стеклянный электрод, практически применимый во всех случаях измерений, получил наиболее широкое распространение. В настоящее время разработано много видов стеклянных электродов, преследующих цель увеличить его механическую прочность и уменьшить внутреннее сопротивление для возможности использования более простых измерительных устройств.

Повышение механической прочности осуществляется несколькими путями.

Электроды с жидкостью сравнения выполняются шарообразной формы и защищаются от механического повреждения оболочкой из пористой массы, тесно прилегающей к стеклянной мембране.

Другим видоизменением этого же способа является заполнение пористой массой внутренней полости электрода. Пористая масса насыщается буферной жидкостью. Этот способ в отношении защиты электрода от действия давления не имеет каких-либо преимуществ по сравнению с первым.

Стремление освободиться от заполнения электрода жидкостью вызвало появление стеклянных электродов, наполненных специальной проводящей массой. Снятие потенциала с внутренней стороны осуществляется металлической обкладкой. Электрод этого типа чрезвычайно удобен для промышленного использования и обладает высокой механической прочностью. Промышленные электроды должны отвечать следующим требованиям:

а) Величина потенциала, соответствующая определенному значению pH, должна оставаться неизменной продолжительное время.

б) Чувствительность, т. е. изменение потенциала на каждую единицу pH, должна длительно сохраняться неизменной.

в) Сопротивление при присоединении измерительного аппарата не должно изменять своей величины.

г) Температурный коэфициент должен быть возможно малым.

д) Абсолютная величина потенциала различных электродов должна быть по возможности одинакова.

е) Электроды должны быстро достигать значения измерения (короткое установочное время).

Все эти требования выполняются новыми типами стеклянных электродов, что обусловливается соответственным выбором сорта стекла, весьма малой толщиной мембраны, соответственным выполнением металлического покрытия. Электроды Сименса из шоттовского стекла 4079[III] имеют сопротивление 5—15 мегом, толщину мембраны до 0,01 *мм*, чувствительность соответствует нернстовской постоянной — 58 *мв*/pH и не изменяется с течением времени. Температурный коэфициент составляет около +0,15 pH/10° C, приближаясь к теоретическому значению для цепи стеклянный — каломельный электроды (+0,12 pH/10°C).

Абсолютное значение потенциала различных электродов разнится максимум на ± 10 *мв*. Абсолютное значение потенциала устойчиво, наибольшее отклонение составляет 0,1 pH в неделю. Установочное время лежит в пределах менее 10 сек.

На рис. 245 изображен стеклянный металлизированный электрод цилиндрической формы, наиболее подходящий для технических измерений. Электрод рассчитан на рабочее давление 2 *кг/см*², но может выдержать давление до 10 *кг/см*². Допустимые колебания температуры от —20 до +50°. Электрод выдерживает длительную работу при 45° без изменения измерительных свойств. Пределы измерений стеклянным электродом от 2 до 10 pH. Если не считаться с отклонением

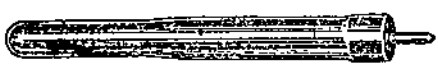


Рис. 245. Стеклянный металлизированный электрод.

от линейной зависимости, пределы измерений могут быть расширены от нуля до 12 pH.

Сурьмяный электрод в противоположность стеклянному не столь универсален, но его механическая прочность и возможность непосредственного присоединения к измерительному гальванометру во многих случаях делают его применение для практических измерений pH весьма целесообразным.

Обычно электрод представляет собой простой сурьмяный стержень. Для очень загрязненных жидкостей и жидкостей с липкими осадками сурьмяные электроды выполняются со щетками, обеспечивающими их непрерывную очистку.

Так как результаты измерения сурьмяным электродом зависят от содержания в исследуемой жидкости соляной кислоты, то необходимо жидкости с сильно колеблющимся содержанием HCl насыщать воздухом.

Поскольку сурьмяный электрод чувствителен к различным влияниям среды, необходимо перед его применением в каждом случае исследовать влияние на него данной жидкости.

Установочное время у сурьмяного электрода значительно больше, чем у стеклянного, и зависит от рода жидкости; оно может дойти до 30 мин. Точность измерений составляет от $\pm$ 0,1 до $\pm$ 0,2 pH. Пределы измерения от 2 до 12 pH, так как за этими пределами линейная зависимость прекращается. Сурьмяный электрод пригоден для исследования сточных, речных и промывных вод в сахарной и бродильной промышленности.

Каломельный электрод сравнения. Стеклянный и сурьмяный электроды работают в паре с каломельным электродом, являющимся электродом сравнения.

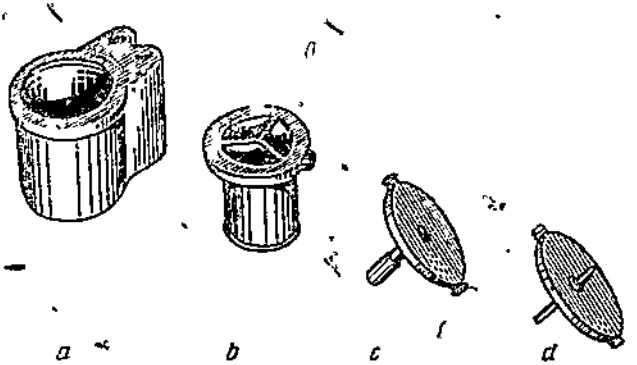


Рис. 246. Каломельный электрод сравнения:
a — измерительный сосуд; *b* — защитный сосуд; *c* — пористый сосуд; *d* — крышка с электродом.

Конструкция каломельного электрода (рис. 246) состоит из защитного сосуда *b*, наполненного раствором KCl, разделенного на три отделения. В одно из этих отделений помещается каломельный электрод, состоящий из пористого сосуда *c*, содержа-

щего каломельную пасту, и платинового стержня, отводящего ток. Все эти детали собираются в измерительном сосуде *а*; в котором в два имеющиеся отверстия в крышке устанавливаются также измерительный электрод (стеклянный или сурьмяный) и термометр сопротивления. Через измерительный сосуд протекает исследуемая жидкость.

Керамиковый измерительный сосуд (рис. 246) рассчитан на избыточное давление до 1,5 *кг/см²*.

При измерении жидкости, находящейся под давлением, в область высокого давления помещают только измерительный электрод, соединяя жидкость под давлением с жидкостью, окружающей каломельный электрод, капиллярными каналами, поглощающими давление.

Каломельный электрод выполняется не только в виде проточного электрода, описанного выше, но и в виде погружного для измерений жидкости в открытых сосудах или каналах.

Измерительное устройство для стеклянного электрода. Внутреннее сопротивление стеклянного электрода в среднем равно 20 мегом. Столь высокое сопротивление потребовало бы чрезвычайно чувствительного гальванометра для непосредственного измерения. Такой прибор не пригоден для технических измерений вследствие значительных температурных колебаний окружающего пространства и значительных температурных изменений сопротивления электрода.

Поэтому для измерения применяют схемы с электронными лампами, так называемые электронные гальванометры. На рис. 247 изображена одна из схем электронного гальванометра с питанием от сети переменного тока. Устройство состоит из выпрямительной части, присоединяемой к сети, и усилительной измерительной части.

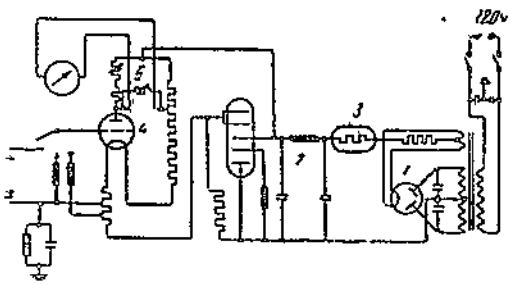


Рис. 247. Схема электронного гальванометра:

1 — выпрямитель тока; *2* — сглаживающий фильтр; *3* — бареттер; *4* — усилительная лампа; *5* — мостик Уитстона.

Выпрямитель *1* двухполупериодного типа снабжен фильтром *2* для сглаживания выпрямленного тока и стабилизатором напряжения (бареттером) *3*. Стабилизатор напряжения поддерживает напряжение выпрямленного тока с точностью до ± 0,1% при колебаниях напряжения сети ± 10%. Стабилизатор состоит из железо-водородной лампы и лампы тлеющего разряда, включенной по рефлексной схеме.

Усилителем служит обычная четырехэлектродная лампа *4*, включенная в одно из плеч мостика *5*, на сетку которой задается потенциал измерительного электрода. Анодный ток лампы изме-

ряется гальванометром. Ничтожное влияние старения лампы компенсируется мостовой схемой включения.

Измерителем может служить нормальный технический указывающий, регистрирующий или регулирующий гальванометр, включенный отдельно или одновременно.

Измерительное устройство для сурьмяного электрода (рис. 248) представляет собой мостовую схему, в диагональ которой последовательно включены электродная цепь и измеряющий гальванометр. В одну из ветвей моста включен термометр сопротивления. При изменении температуры изменяется сопротивление термометра, что нарушает равновесие моста, и в диагонали возникает дополнительный ток, компенсирующий температурные изменения потенциала электродов.

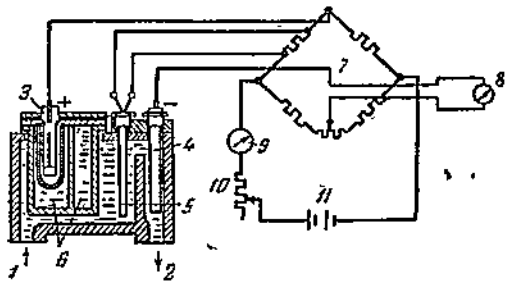


Рис. 248. Схема измерительного устройства для сурьмяного электрода:

1 — вход исследуемой жидкости; *2* — выход исследуемой жидкости; *3* — каломельный электрод; *4* — сурьмяный электрод; *5* — термометр сопротивления; *6* — защитный сосуд; *7* — измерительный мостик; *8* — гальванометр; *9* — амперметр; *10* — реостат батарей; *11* — батарея аккумуляторов.

Чувствительность измерительных схем колеблется в пределах 0,1—0,2 pH.

ГЛАВА XIII

ИЗМЕРИТЕЛИ ЦВЕТНОСТИ И ПРОЗРАЧНОСТИ

54. Методы измерения цветности и прозрачности

Измерение густоты окраски (колориметрия) и степени прозрачности жидкости или газа (нефелометрия) представляют собой широко распространенные методы лабораторного исследования материалов, играющие важную роль в контроле производства химической промышленности.

Колориметрический метод исследования используется в аналитической химии для определения содержания аммиака, хлора, синильной кислоты, фосфорной кислоты, углерода и серы в железе, двуокиси азота в газовой смеси и многих других веществ. В промышленной практике колориметрический метод применяют для контроля качества продуктов и полупродуктов в сахарном, нефтеперегонном, анилинокрасочном, маслобойном и других производствах.

Измерение прозрачности жидкости и газов служит методом контроля работы фильтрующих аппаратов и контроля полноты сжигания топлива в топках.

Колориметрический метод исследования позволяет определять концентрацию растворенного вещества по интенсивности окраски раствора и основан на законах Бера и Ламберта.

Закон Бера устанавливает прямую пропорциональность между концентрацией растворенного вещества и интенсивностью окраски раствора. Закон Бера справедлив лишь для таких растворов, в которых растворенное вещество не претерпевает химических или физических изменений.

По закону Ламберта толщина слоев одинаково окрашенных растворов обратно пропорциональна их концентрации при условии полной монохроматичности поглощаемого средой света.

Математически закон Ламберта-Бера выражается следующими формулами:

$$I = I_0 \cdot e^{-kcx} \qquad (238)$$

или

$$I = I_0 \cdot 10^{-\varepsilon cx} \qquad (239)$$

где I — интенсивность света после поглощения;

I_0 — интенсивность света у поверхности поглощающей среды;

e — основание натуральных логарифмов;

k — коэфициент поглощения, зависящий от природы и физического состояния поглощающей среды и длины волны поглощаемого света;

ε — коэфициент затухания, являющийся обратной величиной толщины слоя (*см*), при котором молярный раствор изучаемого вещества уменьшает интенсивность света до 0,1 первоначальной величины;

c — молекулярная концентрация вещества в растворе;

x — толщина слоя раствора.

Закон Ламберта-Бера приложим к растворам в пределах небольших концентраций, различных для разных красителей и растворителей.

Величина $\lg \frac{I_0}{I} = \varepsilon cx$ называется оптической плотностью вещества и обозначается буквой D. Оптическая плотность среды D пропорциональна концентрации красителя в растворе c и толщине слоя x.

Для двух растворов одного и того же вещества концентрации c_1 и c_2 оптическая плотность будет одинакова при соблюдении равенства:

$$c_1 x_1 = c_2 x_2, \qquad (240)$$

где x_1 и x_2 — толщины слоев.

Это уравнение является основой колориметрического метода химико-технического анализа. Во многих случаях растворитель также поглощает свет в значительной степени. Учитывая это обстоятельство, Винклер предложил улучшенную формулу Бера в форме:

$$(c_1 + A)\, x_1 = (c_2 + A)\, x_2, \qquad (241$$

где константа A зависит от поглощения света растворителем и может быть определена фотометрическим сравнением двух растворов известных концентраций.

Мутность раствора оценивается, так же как цветность, по ослаблению интенсивности света, проходящего через исследуемую жидкость. Ослабление света в мутной среде зависит от многих факторов: размеров и количества взвешенных частиц, цвета и формы их и т. д. В некоторых частных случаях степень ослабления света достаточно точно определяется одним фактором: содержанием взвешенных частиц в единице объема (концентрацией).

Другой метод определения мутности среды основан на способности дисперсных систем рассеивать свет, проходящий через них (эффект Тиндаля). Рассеяние света также зависит от свойств дисперсной системы: количества, размеров, формы и цвета частиц и т. п.

Необходимое условие для рассеяния света — различие коэфициентов лучепреломления среды и взвешенных в ней дисперсных частиц. Если все факторы, кроме числа и размеров частиц, остаются постоянными, то процесс рассеяния света подчиняется уравнению:

$$I = \alpha\, cv, \qquad (242)$$

где I — интенсивность рассеянного света;
α — коэфициент пропорциональности;
c — весовая концентрация частиц в исследуемой среде;
v — средний объем частицы.

С помощью этого уравнения можно определить концентрацию взвешенных частиц при одинаковой величине или среднюю величину частиц в двух системах с равными концентрациями.

Уравнения (240) и (241) использованы для практического измерения цветности лабораторными колориметрами Дюбоска, Шольца и других систем. Принцип работы этих приборов заключается в сравнении двух половин поля зрения, из которых одна половина освещена лучом света, проходящим через исследуемую среду, а другая — лучом света, проходящим через слой определенной толщины эталонной жидкости или через специальный окрашенный светофильтр. Обе половины поля зрения тем или иным способом приводятся к равенству окраски и освещенности. Чаще всего это осуществляется изменением толщины слоя исследуемой жидкости или газа. Измеряя толщину слоя исследуемой жидкости и зная концентрацию эталонного раствора, можно вычислить по уравнению (241) концентрацию исследуемого вещества.

Лабораторные приборы этого типа не пригодны для автоматического контроля, так как требуют ручных манипуляций, кроме того, недостатком этих приборов является субъективность результатов измерений, зависящих от индивидуальных свойств глаза наблюдателя и его тренировки.

Автоматическое объективное измерение цветности и прозрачности в промышленности обязано своим развитием появлению и усовершенствованию фотоэлементов. Точность показаний фотоэлементов, не зависящая практически от скорости протекания процесса, их объективность, приспособляемость к контролю и регулированию самых разнообразных параметров обусловили их широкое распространение в измерительной технике и автоматическом регулировании.

Конструкции фотоэлементов достигли в настоящее время высокого совершенства, и техника располагает большим количеством типов, отвечающих самым разнообразным требованиям.

55. Фотоэлементы

Фотоэлементы, применяющиеся в технике контроля и регулирования, делятся на три группы:

1) фотоэлементы с внешним фотоэффектом;

2) фотоэлементы с внутренним фотоэффектом (фотосопротивления);

3) фотоэлементы с запирающим слоем (вентильные фотоэлементы).

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом. Внешним фотоэффектом называется явление освобождения электронов с освещенной поверхности металла.

Поглощая кванты света, электроны увеличивают за этот счет свою энергию. Если электрон отрывается от поверхности, то максимальная кинетическая энергия его определяется разностью между энергией поглощенного кванта и работой выхода электрона (закон Эйнштейна):

$$\frac{mv^2}{2} = h\nu - P, \qquad (243)$$

где ν — частота излучения;

h — постоянная Планка, равная $6{,}55 \cdot 10^{-27}$ *эрг-сек;*

P — работа выхода электрона.

Наименьшая частота излучения ν_0, при которой возможен отрыв электрона, определяется из равенства:

$$h\nu_0 = P. \qquad (244)$$

Эта предельная частота излучения называется **граничной частотой фотоэлемента**, а длина волны света, соответствующая этой частоте, называется **длинно-волновой границей** или **порогом** фотоэлектрического эффекта.

Обычно энергию вырванных электронов и работу выхода условно выражают напряжением (табл. 19).

Таблица 19

Фотоэлектрическая характеристика различных металлов

Металл	Работа выхода электрона в вольтах	Порог фотоэффекта (в mμ)	Металл	Работа выхода электрона в вольтах	Порог фотоэффекта (в mμ)
Li	2,34—2,38	528—518	Mg	1,77—3,71	698—331
Na	1,80—2,12	686—582	Ca	1,70—3,34	727—370
K	1,46—2,02	2680—611	Sr	1,79—2,15	689—574
Rb	1,20—1,45	1030—852	Ba	1,59—2,29	777—538
Cs	0,70—1,36	1760—908	Zn	3,02—4,10	408—301
Cu	3,85—4,82	321—256	Cd	2,60—4,05	475—305
Ag	3,09—4,71	399—262	Hg	4,05—4,75	305—260
Au	4,33—4,75	285—260	Al	1,77—3,95	697—313

Интенсивность внешнего фотоэффекта тем больше, чем больше частота излучения и чем меньше работа выхода.

Величина фототока тем больше, чем больше квантов энергий попадает на поверхность. Следовательно, величина фототока прямо пропорциональна освещенности фотоэлемента.

Фотоэлектрическая чувствительность металлов зависит от физико-химических свойств поверхности и ее состояния. Соответствующей обработкой и подготовкой поверхности может быть достигнута высокая чувствительность слоя.

В современных фотоэлементах фотоэлектрическая чувствительность резко увеличивается в определенной области спектра. Наблюдается так называемый **селективный фотоэффект**.

Положение и характер этого селективного максимума зависят от природы щелочного металла, его чистоты, от металла подслоя и от природы соединения, образующего промежуточный слой.

Применяемые методы сенсибилизации чувствительного слоя фотоэлементов приводят к появлению резких селективных максимумов чувствительности.

Общая, или интегральная чувствительность, фотоэлемента измеряется силою фототока в микроамперах, возбуждаемого световым потоком в 1 люмен.

Современные фотоэлементы со сложными катодами обладают высокой чувствительностью в длинноволновой части видимого спектра и даже к инфракрасным излучениям, примыкающим к видимому спектру.

При выборе для работы того или иного типа фотоэлемента следует считаться с положением селективного максимума на спектре. Например, несмотря

на то что сложный кислородно-цезиевый фотоэлемент обладает большей общей чувствительностью (70 μ *а*/лм) по сравнению с серно-цезиевыми и селено-цезиевыми фотоэлементами (15—25 μ *а*/лм), применение последних при исследовании с синим и зеленым светом целесообразнее.

Спектральные характеристики этих фотоэлементов приведены на рис. 249.

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом выполняются двух типов: вакуумные и газополные.

Вакуумный фотоэлемент состоит из хорошо эвакуированного стеклянного баллона, внутри которого помещены два изолированных электрода — анод в виде рамки, сетки или спирали и светочувствительный катод в виде тонкого металлического слоя, нанесенного на стенку баллона.

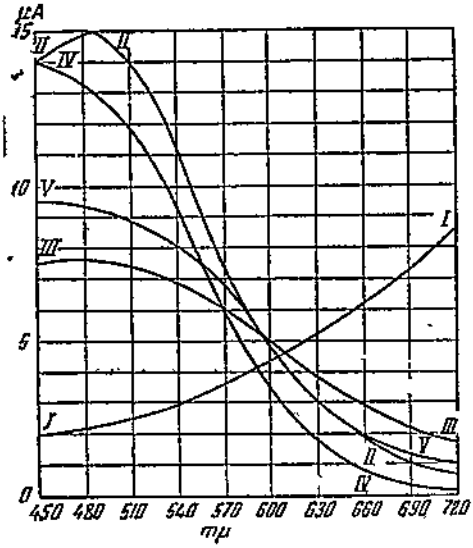


Рис. 249. Спектральные характеристики фотоэлементов:

I — кислородно-цезиевый; *II* и *III* — серно-цезиевые; *V* и *VI* — селено-цезиевые.

Газополный фотоэлемент отличается от вакуумного только тем, что в баллон введен какой-либо инертный газ (аргон, неон) под небольшим давлением.

Газополные элементы отличаются большей чувствительностью за счет вторичного выделения электронов из газовых молекул. Фототок газополных элементов при равной освещенности достигает 10-кратного значения тока вакуумного элемента.

С увеличением наложенного напряжения возрастает фототок газополного элемента, достигая наибольшего значения при напряжении, близком к «потенциалу зажигания газа». Если наложенное напряжение достигает значения потенциала зажигания, возникает тлеющий разряд, способный разрушить светочувствительную поверхность катода и вывести, таким образом, фотоэлемент из строя.

Газополному фотоэлементу свойственна пропорциональность между освещенностью и величиной фототока только в том случае, если наложенное напряжение фотоэлемента далеко отстоит от потенциала зажигания, а внешнее сопротивление мало.

Фотоэлементы с внешним фотоэффектом, включенные в цепь и освещенные мощным световым потоком, изменяют с течением времени общую и селективную чувствительность. Это явление называется утомляемостью фотоэлементов.

При слабом освещении потеря чувствительности составляет 10—30% первоначальной; при сильном освещении наибольшая потеря наблюдается в течение первых 50 час., после 250 час. чувствительность стабилизуется. Общая потеря чувствительности при сильном освещении достигает 45—83%.

Утомляемость фотоэлементов проявляется в большей степени к инфракрасному свету. Чувствительность частично восстанавливается после выдерживания в темноте.

Вакуумные фотоэлементы практически безинерционны. Газополные фотоэлементы обладают заметной инерцией, зависящей от состава и давления газа, состава и свойств фотокатода и от разности между потенциалом зажигания и рабочим напряжением.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом. Явление внутреннего фотоэффекта заключается в увеличении при освещении проводимости некоторых веществ.

Впервые внутренний фотоэффект был обнаружен у кристаллической модификации селена.

Фотоэлементы с внутренним фотоэффектом, или **фотосопротивления**, обладают в темноте очень высоким сопротивлением и, следовательно, весьма малым **темновым** током от приложенного к ним напряжения. При освещении сопротивление падает в несколько раз и ток соответственно увеличивается.

Фотоэлементам с внутренним фотоэффектом свойственны значительная инерция, отсутствие пропорциональности между фототоком и степенью освещенности и зависимость величины фототока от температуры и напряжения внешнего поля. Эти свойства ограничивают применимость этой группы фотоэлементов в схемах автоматического контроля и регулирования.

Значительная отдача мощности фотоэлементами с внутренним фотоэффектом определяет целесообразность применения их в релейных узлах, когда инерционность не имеет значения.

Фотоэлементы с запирающим слоем, или вентильные фотоэлементы. Вентильный фотоэффект по своей природе весьма близок к внешнему фотоэффекту, отличаясь от последнего тем, что эмитированные электроны от катода движутся к соприкасающемуся с ним аноду через запирающий слой, пропускающий электроны только в одном направлении. Катод фотоэлемента с запирающим слоем состоит из полупроводника.

Различают **тыловые**, или **заднестеночные**, фотоэлементы с одним запирающим слоем и **фронтовые**, или **переднестеночные**, фотоэлементы с двумя запирающими слоями.

Вентильные фотоэлементы дают ток во внешнюю цепь при освещении без всякого добавочного напряжения.

Купроксные или меднозакисные тыловые вентильные фотоэлементы наиболее чувствительны к оранжевым и инфракрасным лучам, а фронтовые к видимым и ультрафиолетовым лучам. Селективный максимум фронтовых фотоэлементов лежит в области зеленых лучей с длиной волны около 500 mμ.

Купроксные фотоэлементы обоих типов обладают в известных пределах прямой пропорциональностью между интенсивностью светового потока и величиной фототока.

Инерционность вентильных элементов при освещении их пульсирующим световым потоком становится заметной при частоте пульсаций свыше 1000 *герц*. Температурный коэфициент фронтовых купроксных фотоэлементов зависит от природы металла верхней анодной пленки. Для нормальных температурных условий наиболее подходящими будут фотоэлементы с серебряной пленкой. Утомляемость наблюдается лишь у открытых фотоэлементов. Изолированные от внешней среды, фотоэлементы не утомляются даже при очень длительном освещении.

Селеновые вентильные элементы состоят из трех слоев — железо-селен-полупрозрачная золотая или платиновая анодная пленка с одним запирающим слоем между селеном и анодом.

Важной особенностью селеновых фотоэлементов является их спектральная характеристика, весьма близкая к спектральной характеристике человеческого глаза.

Общая чувствительность селеновых фотоэлементов весьма высока, колеблясь в пределах 300—500 μ A/лм, и доходит у отдельных элементов до 700 μ A/лм.

Для нормальной работы сопротивление внешней цепи должно быть значительно ниже сопротивления запирающего слоя в направлении к селену.

При длительной эксплоатации селеновых фотоэлементов необходимо считаться с возможностью значительной утомляемости особенно при сильном освещении.

56. Фотометрические схемы и приборы

Методы колориметрических и нефелометрических измерений с применением фотоэлементов можно разделить на три группы:

1) Прямое измерение фототока,

2) Дифференциальное или компенсационное измерение с двумя фотоэлементами.

3) Дифференциальное измерение с одним фотоэлементом.

Метод прямого измерения фототока. Простейшая схема измерения цветности или мутности среды заключается в том, что луч света от какого-либо источника проходит через светофильтр, слой стандартной среды (жидкости или газа) и попадает на фотоэлемент, сила тока которого измеряется гальванометром. Вслед за этим луч света проходит через тот же светофильтр, слой исследуемого вещества и вновь направляется на фотоэлемент. Разность показаний гальванометра в первом и втором случае служит мерилом цветности или прозрачности среды.

Точность получаемых результатов зависит от постоянства источника света и чувствительности гальванометра, поэтому на практике предпочитают дифференциальные схемы, исключающие влияние изменения источника света.

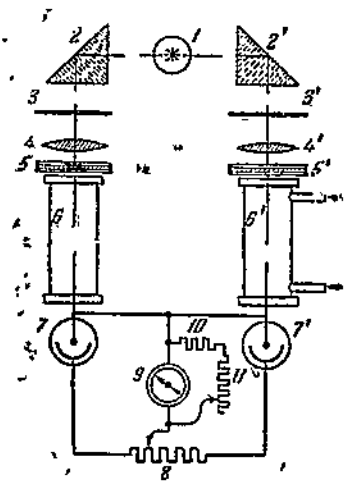


Рис. 250. Дифференциальная схема измерения цветности или прозрачности с двумя фотоэлементами:

1 — осветительная лампа; *2—2'* — призмы; *3—3'* — диафрагмы; *4—4'* — линзы; *5—5'* — светофильтры; *6—6'* — кюветты с растворами; *7—7'* — фотоэлементы; *8* — сопротивление для установки на нуль; *9* — гальванометр; *10—11* — шунтирующие сопротивления

Дифференциальная схема с двумя фотоэлементами. На рис. 250 изображена принципиальная схема измерения цветности или прозрачности среды по дифференциальному методу с двумя фотоэлементами. Оба фотоэлемента должны быть одного типа и с тождественной характеристикой. Лучи света от лампы *1* поступают через призмы *2—2'* диафрагмы *3—3'*, линзы *4—4'* и светофильтры *5—5'* параллельными пучками на два фотоэлемента *7—7'*, проходя предварительно через сосуды *6* и *6'*, один из которых содержит эталонную, а другой исследуемую среду. Встречные токи обоих фотоэлементов при одинаковой цветности или прозрачности обеих сред будут равны и взаимно компенсированы. Если же цветность или прозрачность исследуемой среды будет отличаться от эталонной, компенсация нарушится и в цепи гальванометра *9* возникнет ток, сила которого будет мерилом различия цветности или мутности исследуемой среды.

Фотоэлементы, используемые в дифференциальной схеме, должны удовлетворять требованиям идентичности спектральных и люксамперных характеристик, одинаковой чувствительности и утомляемости. Затруднительность подбора фотоэлементов, удовлетворяющих полностью этим требованиям, вызвала к жизни дифференциальные схемы измерений с одним фотоэлементом.

Дифференциальная схема с одним фотоэлементом. Метод дифференциального измерения с одним фотоэлементом конструктивно наиболее сложен, но обладает крупным преимуществом почти полного устранения влияний непостоянства источника света и фотоэлемента.

На рис. 251 дана принципиальная схема дифференциального колориметра или нефелометра с одним фотоэлементом. Световой поток лампы *1* идет по двум направлениям через линзы *2* и *2'* и падает на два зеркала *3* и *3'*. Отразившись от зеркал, оба световых луча проходят через диафрагмы *4* и *4'* и далее через сосуды *5* и *5'*, из которых сосуд *5* содержит эталонную среду, а через сосуд *5'* непрерывно протекает исследуемая жидкость или газ. Далее, лучи света собираются линзами *6*, *6'* и системой зеркал *7*, *7'*, *8*, *8'* направляются на фотоэлемент *9*.

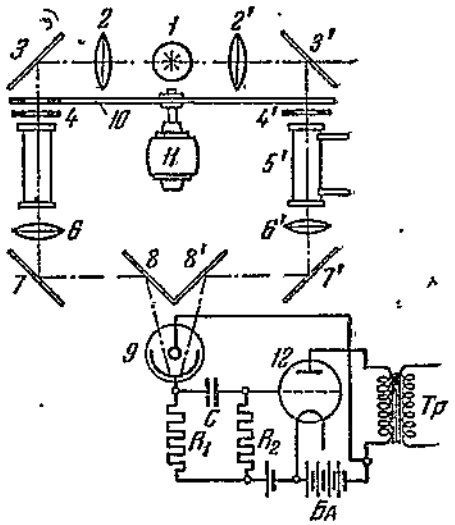


Рис. 251. Дифференциальная схема измерения цветности или прозрачности с одним фотоэлементом:

1—осветительная лампа; *2* и *2'*—собирающие линзы; *3* и *3'*—зеркала; *4* и *4'*—диафрагмы; *5* и *5'*—кюветы с растворами; *6* и *6'*—линзы; *7*, *7'*, *8* и *8'*—зеркала; *9*—фотоэлемент; *10*—прерывающий диск; *11*—электромотор; *12*—электронная лампа; *C*—конденсатор; R_1 и R_2—сопротивления; $Т_р$—измерительный трансформатор; $Б_А$—анодная батарея.

На пути обоих лучей перед диафрагмами *4*, *4'* помещен диск *10* с отверстиями. Диск вращается мотором *11*, поочередно преграждая путь одному и другому лучу. В результате на фотоэлемент *9*, чередуясь, попадает луч, прошедший через эталонный сосуд, или луч, прошедший через исследуемую среду.

При одинаковой цветности или прозрачности сравниваемых сред на фотоэлемент будут падать лучи одинаковой интенсивности.

Если же оптические свойства среды в сосуде *5'* хотя немного изменятся, на фотоэлемент будет падать пульсирующий поток света, что создаст в цепи фотоэлемента пульсирующий ток, переменная составляющая которого, усиленная электронной лампой *12*, может быть измерена и дает величину отклонения исследуемой среды от эталона.

Так как в этой схеме применен метод сравнений фототоков, снимаемых с одного фотоэлемента, непостоянство чувствительности фотоэлемента во времени и изменение режима излучения лампы *1* не отражаются на результатах измерения. Единственным условием является высокая чувствительность фотоэлемента

к соответствующему участку спектра в зависимости от цвета исследуемой среды.

Непрерывно действующий колориметр ЦНИЛКИП. Автоматический непрерывно действующий колориметр ЦНИЛКИП построен по диференциальной схеме с двумя фотоэлементами. Схема колориметра показана на рис. 250. Световой поток от 6—8-вольтовой лампы *1* падает на две призмы полного внутреннего отражения *2* и *2'*, после чего идет двумя параллельными пучками через диафрагмы *3* и *3'*, линзы *4* и *4'*, светофильтры *5* и *5'* в сосуды *6* и *6'* с эталонной и исследуемой жидкостью. После прохождения через слой жидкости световые лучи падают на два фотоэлемента *7* и *7'*.

Фотоэлементы включены навстречу друг другу через сопротивление *8*. В перемычку цепи фотоэлементов включен гальванометр *9*, шунтированный сопротивлениями *10* и *11*.

Исследуемая жидкость непрерывно протекает через сосуд *6*. При равенстве оптических свойств эталонной и исследуемой жидкости освещенность обоих элементов одинакова и фототоки взаимно компенсируются.

Ток через гальванометр не идет, и стрелка остается на нуле. Если исследуемая жидкость будет светлее или темнее эталонной, в цепи гальванометра появится ток, сила которого будет пропорциональна изменению степени окраски исследуемого раствора. Измерение может производиться по нулевому методу; приведение гальванометра к нулю производится перестановкой движка сопротивления *8*, и отсчет ведется по шкале движка. Шкала движка имеет 250 делений. Последнее деление соответствует 100% абсорбции света, т. е. полному затемнению фотоэлемента *7*.

При автоматической работе отсчеты производятся по шкале гальванометра, имеющей 100 делений (последнее деление соответствует 100%-ному поглощению света).

Гальванометр при автоматической работе может быть указывающим, регистрирующим и контактным.

Переменное сопротивление *11* шунта гальванометра служит для регулировки чувствительности гальванометра.

В приборе применены селеновые фотоэлементы. Для расширения диапазона измерений прибор снабжается сменными сосудами *6* и *6'* одного диаметра (40 *мм*) и разной длины: 250, 150, 100 и 50 *мм*.

Абсорбциометр ЦНИЛКИП сист. Мордхеловича и Вайнштока для автоматического измерения и регистрации прозрачности растворов. Схема прибора, построенного по диференциальному принципу с одним фотоэлементом, изображена на рис. 252.

Устройство прибора заключается в следующем. Световые лучи от 50-ваттной лампы *1*, собранные линзами *2* и *2'* в параллельные пучки, проходят попеременно через эталонный и исследуемый раствор, находящиеся в кюветах *3* и *3'*.

Лучи, прошедшие один или другой раствор, после трехкратного отражения зеркалами *4*, *5*, *6* или *4'*, *5'*, *6'* попадают на фотоэлемент *7*.

Чередование световых потоков выполняется двумя вращающимися дисками *8* и *8'*, сидящими на общей оси и имеющими длинные концентрические вырезы на уровне кювет.

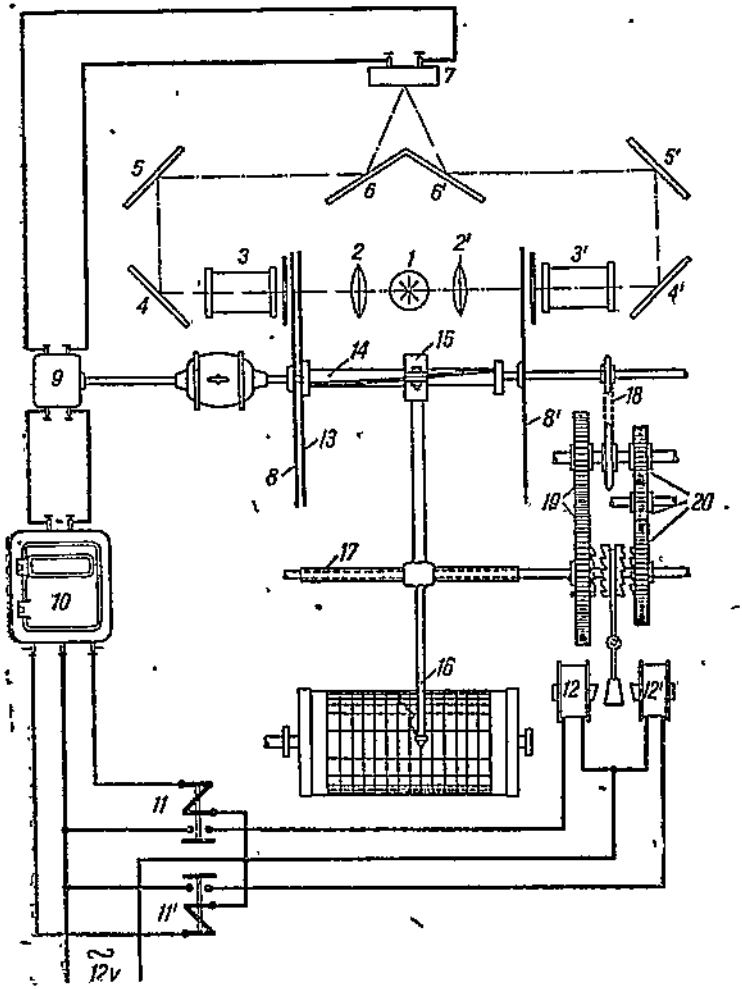


Рис. 252. Схема абсорбциометра ЦНИЛКИП:

1 — осветительная лампа; *2* и *2'* — собирательные линзы; *3* и *3'* — кюветы с растворами; *4*, *5*, *6* и *4'*, *5'* *6'* — зеркала; *7* — фотоэлемент; *8* и *8'* — диски прерыватели; *9* — коммутатор; *10* — контактный гальванометр; *11* и *11'* — реле первичные; *12* и *12'* — вторичные реле; *13* — секторная заслонка; *14* — полая ось заслонки; *15* — скользящая втулка; *16* — перо; *17* — ходовой винт; *18* — цепная передача; *19* и *20* — зубчатая передача.

Световые импульсы вызывают в фотоэлементе пульсирующий фототок, который коммутатором *9*, вращающимся синхронно с

дисками, переключается так, что импульсы фототока, вызванные левой и правой ветвью светового потока, становятся направленными навстречу друг другу.

В случае оптического равенства сравниваемых жидкостей алгебраическая сумма противоположных токов будет равна нулю, при оптическом различии эталонного и исследуемого растворов она будет пропорциональна относительной прозрачности исследуемой жидкости.

Диски и коммутатор вращаются со скоростью 20—24 об/сек., поэтому контактный гальванометр постоянного тока *10*, соединенный с коммутатором, в случае однородности растворов не даст отклонения стрелки, а при неоднородности стрелка гальванометра отклонится вправо или влево.

При отклонении стрелки контактный гальванометр замкнет цепь одного из реле *11* и *11'*, которые в свою очередь приведут в действие одно из двух реле *12* или *12'*. Срабатывание последних приведет в действие механизм компенсатора, связанный с регистрирующим приспособлением. Компенсатор действует, пока не приведет алгебраическую сумму фототоков снова к нулю.

Компенсатор представляет собой секторную заслонку *13*, сидящую на полой оси *14*, охватывающей ось дисков и вращающуюся вместе с дисками. Заслонка может поворачиваться относительно диска *8*, уменьшая длину выреза в диске.

Поворот заслонки осуществляется передвижением вдоль оси дисков втулки *15*. Втулка *15* связана сквозным штифтом, проходящим через винтовую щель оси *14* и продольную щель оси дисков. При перемещении втулки вдоль осей штифт, скользя одновременно по прямой и винтовой щели, вызовет относительный поворот оси *14*, а следовательно, и поворот затвора *13*.

Втулка *15* и связанное с ней перо *16* передвигаются винтом *17*, получающим вращение от оси дисков через цепную передачу *18* и две системы зубчатых передач *19* и *20*, осуществляющих вращение винта в одну или другую сторону. Включение одной из зубчатых передач выполняется реле *12* и *12'*.

При повороте затвора *13* относительно диска *8* уменьшается действующая длина выреза, а следовательно, сокращается длительность светового импульса в левой ветви светового потока. Это приводит к выравниванию импульсов фототоков, и алгебраическая сумма их приводится к нулю. Возвратившаяся в нулевое положение стрелка гальванометра выключает реле *11* и *12*, останавливая действие компенсирующего механизма до нового нарушения оптического равновесия.

Регистрирующее перо записывает перемещения секторного затвора, пропорциональные изменению прозрачности исследуемого раствора по сравнению с эталонным.

Измеритель густоты дыма Сименса-Гальске. Прибор Сименса-Гальске для автоматического контроля густоты дыма действует также на принципе абсорбции света слоем дыма. Измерение производится по дифференциальной схеме, но воспринимающим органом служат не фотоэлементы, а чувствительные термоэлементы.

Схема устройства прибора изображена на рис. 253. Свет от 100-ваттной лампы *1*, нагруженной для увеличения долговечности на 50 *вт*, падает через линзу *2* на плоское зеркало *3*. Большая часть лучей отражается зеркалом под прямым углом и направляется в дымовой канал. Пройдя слой дыма, световой пучок попадает на вогнутое зеркало *4*, отражающее свет суживающимся пучком обратно на зеркало *3*. Отраженные лучи попадают в центральную часть зеркала, имеющую окно без зеркального слоя. Лучи проходят сквозь это окно, собираются линзой, в фокусе которой помещен вакуумный термоэлемент *5*.

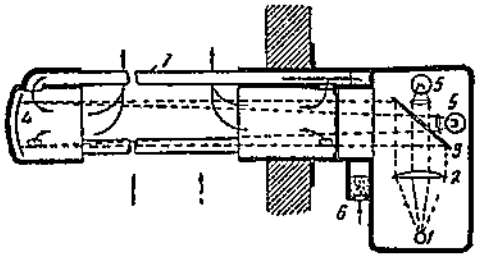


Рис. 253. Схема измерителя густоты дыма Сименса-Гальске:

1 — осветительная лампа; *2* — линза; *3* — зеркало; *4* — вогнутое зеркало; *5* и *5*^{1} — термоэлементы; *6* — отверстия для засоса воздуха; *7* — воздухопровод.

Меньшая часть лучей лампы проходит без отражения через центральное окно зеркала *3* и собирается линзой на таком же термоэлементе *5*^{1}.

Оба термоэлемента включены в цепь гальванометра навстречу один другому, так что гальванометр измеряет разность токов обоих термоэлементов. Один из термоэлементов получает лучистую энергию непосредственно от лампы *1*, второй же лучистую энергию, уменьшенную за счет поглощения при двукратном прохождении слоя дыма. Чем гуще окраска дыма, тем больше становится разность токов термоэлементов и тем больше отклонение стрелки гальванометра.

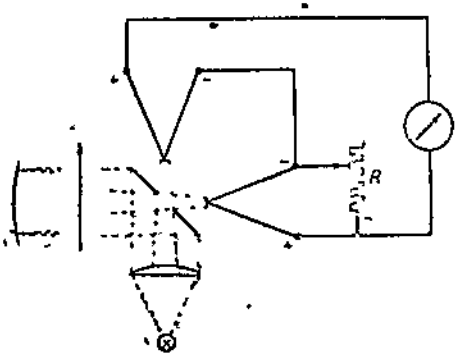


Рис. 254. Электрическая схема измерителя густоты дыма:

R — шунтирующее сопротивление.

Для защиты оптической части прибора от запыления зеркало *4* и стеклянный экран непрерывно омываются потоком воздуха, засасываемого через отверстия *6* и поступающего к зеркалу *4* по трубам *7*, составляющим каркас прибора.

На рис. 254 приведена схема электрических соединений прибора.

Шунтирующее сопротивление *R* в цепи одного из термоэлементов (рис. 254) служит для корректировки нуля прибора.

Прибор снабжается указывающим гальванометром профильного типа со шкалой Рингельмана, очень удобной для наблюдения. К прибору может быть присоединен также регистрирующий гальванометр.

ГЛАВА XIV

ИЗМЕРИТЕЛИ ПЛОТНОСТИ И ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ

57. Плотномеры с плавающим поплавком

Общие сведения. Измерение плотности жидкости в ряде случаев имеет большое значение для контроля технологических процессов. Контроль и регулирование работы выпарных установок, абсорберов, дестилляционных и ректификационных аппаратов и т. п. требуют непрерывного измерения плотности жидкости.

Плотностью или удельным весом жидкости называется масса или вес единицы ее объема. Поэтому единица измерения плотности в системе МКS будет 1 *кг/м*^{3}, в системе CGS 1 *г/см*^{3}.

На практике чаще пользуются относительной плотностью, или относительным удельным весом, представляющим отношение веса объема жидкости к весу того же объема воды, принимаемому за единицу. Относительная плотность является безразмерной величиной.

Иногда плотность жидкости выражается в условных единицах — градусах Боме, Баллинга, Брикса, Траллеса и др., соответствующих процентному содержанию какого-либо вещества в растворе. Переход от этих условных единиц к единицам плотности производится по таблицам, имеющимся во всех химических справочниках.

Приборы для определения плотности жидкости в зависимости от метода измерения, положенного в основу их устройства, могут быть разделены на:

а) приборы пикнометрические, измеряющие плотность непосредственным взвешиванием определенного объема жидкости;

б) приборы ареометрические, в которых измерение плотности выполняется поплавком постоянного веса, вытесняющим определенный объем жидкости. Ареометрические приборы делятся на приборы с поплавком, плавающим на поверхности жидкости, и приборы с погруженным в жидкость поплавком;

в) приборы пьезометрические, в основе которых лежит измерение давления внутри жидкости, пропорционального плотности. Пьезометрические приборы также можно разделить на две группы: приборы, непосредственно измеряющие давление столба жидкости, и приборы, измеряющие давление столба жидкости косвенным путем по давлению воздуха, компенсирующего давление столба жидкости.

Большинство промышленных приборов для измерения плотности принадлежит к группе ареометрических приборов с плавающим и погруженным поплавком.

Ареометр. Обычный ареометр представляет собой стеклянный цилиндрический поплавок, снабженный в верхней части длинной тонкой шейкой. Нижняя часть поплавка нагружена ртутью или свинцовой дробью для устойчивого вертикального положения прибора в жидкости. В шейке помещена шкала, разделенная на единицы относительной плотности или на условные градусы. При измерении плотности ареометр осторожно погружают в стеклянный цилиндр, наполненный испытуемой жидкостью; в зависимости от плотности жидкости ареометр погрузится до определенного предела. Отсчет производится по делению шкалы, совпадающему с поверхностью жидкости.

Ареометры этого типа являются лабораторными приборами, хотя и применяются иногда для промышленного контроля. В этом случае ареометр помещается в цилиндр, через который непрерывно протекает исследуемая жидкость. Неудобства обычного ареометра для промышленного контроля заключаются в нечеткости делений шкалы, невозможности записи показаний и хрупкости прибора.

Поэтому для промышленного контроля предпочтительней пользоваться описанными ниже специальными ареометрами, свободными от указанных недостатков.

Регистрирующий плотномер системы Фольквари. Прибор Фольквари принадлежит к числу старейших приборов этой группы измерителей. Плотномер Фольквари (рис. 255) состоит из чугунной колонны *1*, внутри которой вставлена концентрическая цилиндрическая перегородка *2*. В полости, образованной перегородкой, плавает металлический поплавок *3* большого объема, несущий на себе тонкий металлический стержень *4*, выходящий через отверстие в крышке колонны в ее головную часть *5*, содержащую шкалу и регистрирующий механизм.

Исследуемая жидкость поступает через патрубок *6* в сосуд-ловушку *7*, откуда по трубе *8* перетекает в нижнюю часть колонны *1*. Пройдя через решетку *9*, устраняющую завихрения, жидкость заполняет внутреннюю полость, образованную цилиндрической перегородкой *2*, и, сливаясь через края последней, попадает в кольцевое пространство между перегородкой и стенками колонны, откуда уходит через патрубок *10*.

Сосуд-ловушка *7* служит для отделения пены, которая, собираясь в верхней части ловушки, удаляется по трубе *11* в выходной патрубок прибора.

В протекающую через прибор жидкость погружен термометр *12*, по показаниям которого можно вводить поправки в значения указываемой прибором плотности жидкости. В новых моделях добавлен термограф, записывающий кривую температуры на той же бумажной ленте параллельно с кривой изменения плотности.

На рис. 256 представлена головка прибора с диаграммным барабаном *1* для двух кривых — плотности и температуры, шка-

лой плотностей *2*, ртутным термометром *3* и коррекционной шкалой *4*, дающей непосредственно величину поправки плотности на температуру.

Прибор дает величину плотности с точностью до $\pm$ 0,01—$\pm$ 0,02 единицы.

Недостатком прибора является его громоздкость и отсутствие автоматического корректирования температуры.

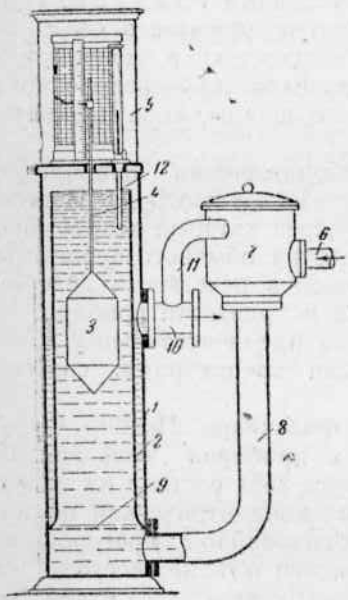


Рис. 255. Регистрирующий плотномер Фолькварца:

1 — колонна; *2* — цилиндрическая перегородка; *3* — поплавок плотномера; *4* — стержень поплавка; *5* — головка прибора; *6* — входной патрубок; *7* — ловушка; *8* — переточная труба; *9* — струевыпрямляющая решетка; *10* — выходной патрубок; *11* — сливная труба ловушки; *12* — термометр.

Плотномер Эккардта. Схема прибора показана на рис. 257. Прибор состоит из U-образного сосуда *1*, через который непрерывным потоком протекает исследуемая жидкость, поступающая через патрубок *2* и уходящая через па-

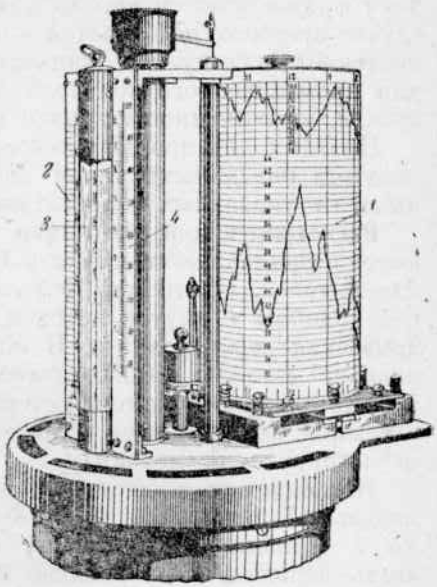


Рис. 256. Головка плотномера Фолькварца:

1 — диаграммный барабан; *2* — шкала плотности; *3* — ртутный термометр; *4* — коррекционная шкала.

трубок *3*. В широком колене сосуда помещен поплавок ареометра *4*, шпиндель которого *5* выходит в регистрирующую часть прибора. Головка шпинделя снабжена указателем, движущимся по шкале *6*.

Регистрация показаний периодическая и выполняется следующим способом. От малого электромотора вращаются оси с насаженными на них кулачками *7* и *8*. Кулачек *7* управляет зажимом *9*, фиксирующим положение шпинделя ареометра. Кулачек *8* — щупом *10*, связанным с регистрирующим пером прибора. Два раза в минуту кулачек *7* зажимает шпиндель ареометра, после чего

кулачек *8* опускает щуп *10* до встречи его с головкой шпинделя. Угол поворота щупа определяется, таким образом, положением головки шпинделя, т. е. значением плотности жидкости. В дальнейшем щуп поднимается кулачком *8*, зажим освобождается кулачком *7* и ареометр может свободно установиться в новое положение равновесия. Так как в этом приборе ареометр не несет никакой добавочной нагрузки, чувствительность и точность прибора значительно выше ареометра Фолькварца. Точно так же габариты прибора значительно меньше.

Прибор может быть снабжен термографом, записывающим колебания температуры на общей диаграммной ленте, а также контактным устройством, сигнализирующим о ненормальном изменении плотности. Контактное приспособление может быть использовано для целей автоматической регулировки плотности.

Недостатком прибора является отсутствие автоматической компенсации температурных изменений плотности, что затрудняет чтение и обработку диаграммы.

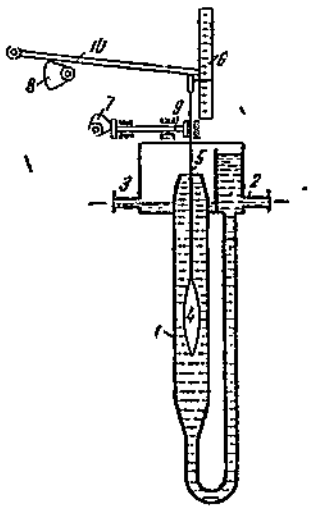


Рис. 257. Схема плотномера Эккардта:

1 — U-образный сосуд; *2* — входной патрубок; *3* — выходной патрубок; *4* — поплавок ареометра; *5* — шпиндель поплавка; *6* — указатель; *7* и *8* — кулачки; *9* — зажим шпинделя; *10* — щуп.

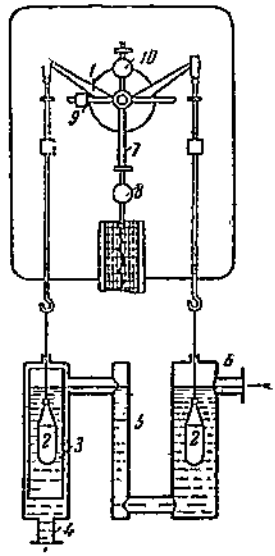


Рис. 258. Схема плотномера с автоматической компенсацией температуры:

1 — коромысло весов; *2* — гирьки-поплавки; *3* — сосуд эталонной жидкости; *4* — входной штуцер; *5* — переточная труба; *6* — выходной штуцер; *7* — рычаг — стрелка весов; *8* — уравновешивающий груз; *9* и *10* — регулировочные грузы.

Плотномер с автоматической компенсацией температуры. На рис. 258 схематически изображен плотномер с автоматической компенсацией колебаний температуры. Прибор действует по принципу весов Мора-Вестфаля.

К равноплечему весовому коромыслу *1* подвешены две равные гирьки *2*, из которых одна погружена в поток исследуемой жид-

кости, а другая в эталонную жидкость, находящуюся в сосуде *3*, омываемом снаружи потоком исследуемой жидкости. Температурный коэфициент эталонной жидкости равен температурному коэфициенту исследуемой. Жидкость входит в прибор через штуцер *4*, омывает сосуд с эталонной жидкостью, затем по переточной трубе *5* переходит в измерительный сосуд и удаляется через штуцер *6*. Выравнивание температур эталонной и исследуемой жидкости автоматически компенсирует влияние температуры. Изменение плотности исследуемой жидкости выводит весы из положения равновесия. Отклонение весового коромысла записывается на бумажной ленте пером, прикрепленным к рычагу весов *7*. Этот же рычаг несет груз *8*, создающий противодействующий момент. Грузы *9* и *10* служат для первоначальной регулировки прибора.

Измерительная часть прибора (сосуды и гирьки) может быть выполнена из коррозионностойких материалов, поэтому прибор пригоден для измерения плотности активных жидкостей. Трение пера о диаграммную ленту несколько снижает чувствительность прибора, создавая погрешность порядка $\pm$ 0,02—$\pm$ 0,03 единицы плотности.

58. Плотномеры с погруженным поплавком

Плотномер системы Кента изображен на рис. 259. В чугунном сосуде *1*, герметически закрытом крышкой *2*, помещена подвижная система, состоящая из поплавка *3*, соединенного трубкой *4* с центральным цилиндрическим сосудом *5*. К сосуду *5* прикреплен рычаг *6* с винтовой нарезкой, по которой могут передвигаться грузы *7* и *8*, служащие для уравновешивания системы. К сосуду *5* прикреплен также вертикальный рычаг *9* с грузом *10*. Вся система опирается призмами *11* на подушки, покоящиеся на станине *12*. Центральный сосуд *5* несет также рычаг *13*, соединенный с магнитом *14* магнитной муфты *15*. Поплавок *3* пронизан системой трубок *16* для увеличения поверхности теплообмена с окружающей средой и заполнен эталонной жидкостью, наполняющей также трубку *4* и часть сосуда *5*.

Через сосуд *1* непрерывно протекает исследуемая жидкость, входящая через штуцер *17* и выходящая через штуцер *18*. В сосуде *1* помещены решетки *19* и *20*, устраняющие завихрения жидкости в приборе и делающие поток ламинарным. При совпадении плотности эталонной жидкости, заполняющей поплавок *3*, с плотностью исследуемой жидкости подвижная система будет находиться в равновесии.

При увеличении плотности исследуемой жидкости поплавок *3* будет всплывать и при уменьшении ее — тонуть.

Угол поворота системы будет определяться величиной разности плотностей, так как новое равновесие подвижной системы будет определяться равенством вращающих моментов поплавка и груза *10*. Поворот подвижной системы передается при помощи магнитной муфты *15* на стрелку, движущуюся по циферблату в кожухе *21*.

Влияние изменения температуры на плотность жидкости устраняется заполнением поплавка *3* эталонной жидкостью с тем же температурным коэфициентом расширения, что и исследуемая жидкость.

Повышение температуры исследуемой жидкости вызовет соответствующий нагрев эталонной жидкости в поплавке *3*, что произойдет весьма быстро благодаря сильно развитой поверхности теплообмена поплавка *3*.

Расширение эталонной жидкости в поплавке заставит часть ее по трубке *4* перейти в сосуд *5*, вследствие чего вес поплавка уменьшится ровно настолько, насколько уменьшится вес вытесняемого им объема испытуемой жидкости вследствие температурного уменьшения плотности, и система останется в равновесии. При понижении температуры вес поплавка за счет перехода в него жидкости из сосуда *5* соответственно увеличится, сохраняя равновесие подвижной системы.

Прибор выполняется указывающим или регистрирующим и может быть снабжен омическим передатчиком показаний на расстояние.

Цена деления — 0,001 единицы плотности.

Точность прибора ± 2%.

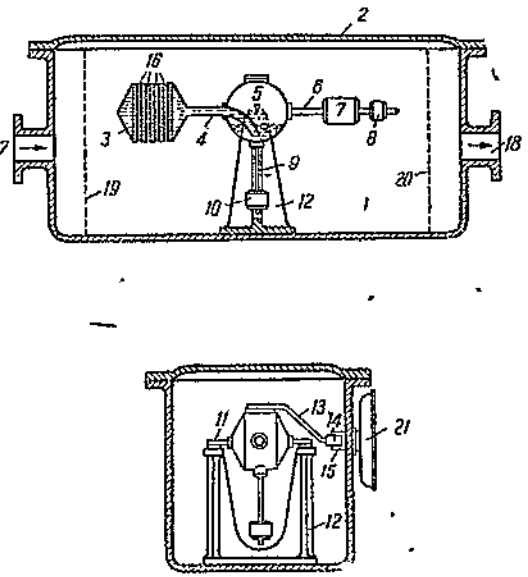


Рис. 259. Плотномер Кента:

1 — проточный сосуд; *2* — крышка сосуда; *3* — поплавок; *4* — соединительная трубка; *5* — центральный сосуд; *6* — рычаг противовеса; *7, 8* — регулирующие грузы; *9* — рычаг весового квадранта; *10* — уравновешивающий груз; *11* — опорные призмы; *12* — станина; *13* — передаточный рычаг; *14* — магнит; *15* — магнитная муфта; *16* — теплообменные трубки; *17* и *18* — входной и выходной штуцера; *19, 20* — струевыпрямляющие решетки; *21* — кожух указателя.

Плотномер Института азота системы О. Г. Кацнельсона. Прибор О. Г. Кацнельсона ареометрического типа с полностью погруженным поплавком постоянного веса. Действие его основано на искусственном изменении температуры жидкости с таким расчетом, чтобы кажущаяся плотность жидкости оставалась постоянной.

Измерение плотности заменяется в этом приборе измерением температуры, что может быть осуществлено с гораздо большей степенью точности.

На фиг. 260 изображена схема прибора. Исследуемая жидкость по трубе *1* поступает в подогреватель *2*, снабженный элек-

трическим нагревательным элементом *3*. Из подогревателя исследуемая жидкость по трубкам *4* и *5* поступает в измерительный сосуд *6*, внутри которого помещен цилиндрический кольцеобразный поплавок *7*. В осевом сквозном канале поплавка расположен неподвижный термометр сопротивления *8*. Верхняя часть поплавка непрозрачна и при подъеме поплавка прерывает луч света от осветительной лампы *9* к фотоэлементу *10*. Исследуемая жидкость поступает с обоих концов измерительного сосуда и выходит в средней его части по трубе *11*. Такое направление движения жидкости устраняет действие скорости потока на поплавок.

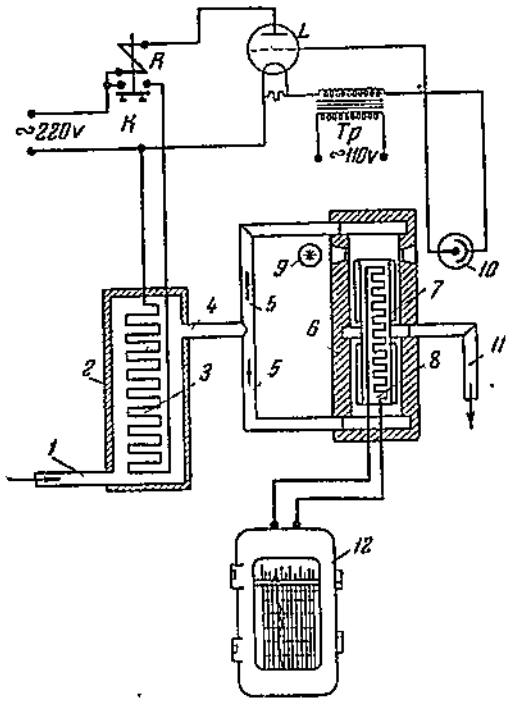


Рис. 260. Схема автоматического плотномера системы Кацнельсона:

1 — подводящая труба; *2* — подогреватель; *3* — обогревательный элемент; *4* и *5* — соединительные трубки; *6* — измерительный сосуд; *7* — поплавок; *8* — термометр сопротивления; *9* — осветительная лампа; *10* — фотоэлемент; *11* — выходная трубка; 12 — логометр; *L* — усилительная лампа; *R* — реле; *K* — контакты реле; *Tp* — трансформатор.

Ток от фотоэлемента *10* подается на сетку усилительной электронной лампы *L*, запирая лампу. При повышении плотности жидкости поплавок всплывает и прерывает освещение фотоэлемента. Ток фотоэлемента уменьшается, лампа *L* становится проводимой, реле *R*, включенное в анодную цепь лампы, срабатывает, замыкая нормально разомкнутые контакты *K* цепи нагревательного элемента. Повышение температуры жидкости уменьшает ее плотность, поплавок *7* опускается, открывая луч на фотоэлемент, лампа *L* запирается и реле *R* выключает ток на нагреватель. Таким образом, температура жидкости непрерывно регулируется так, что поплавок находится в равновесии, т. е. кажущаяся плотность жидкости остается постоянной.

Температура жидкости измеряется логометром *12*, проградуированным в единицах плотности.

На рис. 261 представлена конструкция измерительного сосуда. Измерительный сосуд состоит из корпуса *1* с цилиндрическим каналом, закрытого с обоих концов пробками *2* и *3*. Пробка *3* снабжена сквозным каналом с сальником для прохода стержня

термометра сопротивления *5*. Внутри корпуса помещен стеклянный цилиндрический поплавок *4*.

Жидкость подается по трубкам *6* и *7* к обоим концам сосуда и отводится по трубке *8*. Вход жидкости регулируется двумя игольчатыми вентилями *9* и *10*, при помощи которых можно точно уравнять скорости обеих ветвей потока жидкости.

На уровне верхней кромки поплавка в стенках корпуса просверлены диаметрально отверстия *11* и *12*, закрытые стеклами.

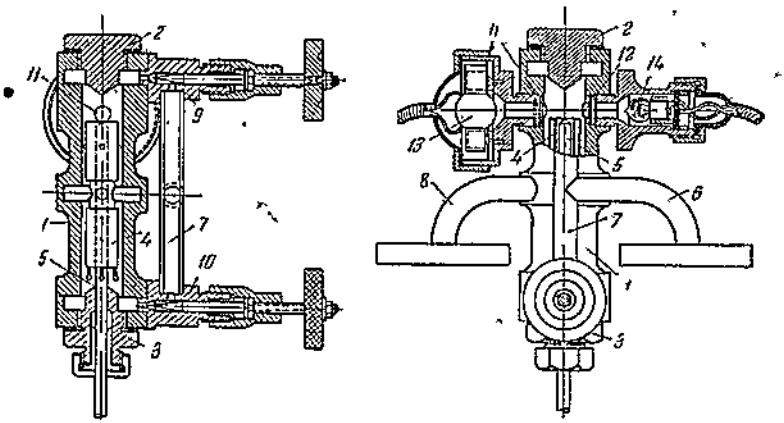


Рис. 261. Датчик плотномера системы Кацнельсона:

1 — корпус датчика; *2* и *3* — пробки; *4* — поплавок; *5* — термометр сопротивления; *6* и *7* — трубки подачи жидкости; *8* — сточная трубка; *9* и *10* — игольчатые вентили; *11* и *12* — окошки; *13* — камера фотоэлемента; *14* — камера осветителя.

К отверстию *11* привинчена камера фотоэлемента *13*, а к отверстию *12* камера осветительной лампы *14*.

Прибор измеряет плотность с большой точностью; так, например, для серной кислоты изменение температуры на 1° соответствует изменению плотности на 0,001 единицы.

Точность измерения температуры термометром сопротивления легко может быть доведена до 0,5°, что будет соответствовать точности измерения плотности до 0,0005 единицы.

Потребление энергии на подогрев невелико и составляет около 50 *вт*.

59. Вискозиметры

Вязкостью называется величина внутреннего трения, вызывающего сопротивление относительному сдвигу частиц жидкости.

Вязкость измеряется величиной силы, необходимой для поддержания постоянной разности скоростей двух параллельных слоев жидкости, отстоящих друг от друга на единицу длины.

Абсолютными единицами вязкости являются пуаз, имеющий размерность 1 *дина сек/см²* и 1 *г/сек см*, и сантипуаз, равный 0,01 пуаза. Кроме абсолютных единиц вязкости применяются относительные безразмерные единицы, представляющие отношение вязкости жидкости к вязкости воды, принимаемой за единицу. Часто вязкость измеряется условными единицами — градусами Энглера, Сейболта и др.

Для измерения вязкости применяются приборы называемые вискозиметрами, основанные на измерениях либо времени истечения определенного объема жидкости через капиллярную трубку, либо величины крутящего момента, создающегося трением слоя жидкости у поверхности вращающегося цилиндра или диска, либо, наконец, времени падения тяжелого шарика сквозь слой жидкости определенной толщины.

Эти методы использованы для создания многочисленных приборов лабораторного типа периодического не автоматического действия, что делает их мало пригодными в текущем контроле производственных процессов.

В то же время вязкость для многих продуктов представляет величину, точно определяющую качество и состав продукта (искусственное волокно, синтетические смолы, растворы каучука, нефтепродукты и мн. др.). Поэтому чрезвычайно желательна разработка конструкции производственного, непрерывно и автоматически действующего вискозиметра; над этой задачей работают исследователи многих стран.

Из сравнительно немногочисленных измерителей вязкости следует рассмотреть один, предназначенный для автоматического контроля вязкости смазочных масел.

Автоматический вискозиметр системы Кента. Прибор (рис. 262) представляет собой чугунный корпус *1* с двумя фланцами для включения в трубопровод, по которому протекает исследуемая жидкость. Внутри корпуса помещены два полых диска *2* и *3*, сидящие на параллельных осях. Диски *2* и *3* зубчатой передачей *4* приводятся во вращение в одном направлении от мотора *5*. Оба диска снабжены в нижней части патрубками *6* и *7*, погруженными в ртуть, заполняющую ванну *8*. Таким образом, внутренние полости дисков закрыты ртутным гидравлическим затвором. Полость диска *2* соединяется с пространством внутри корпуса прибора через ряд малых отверстий *a* в верхней и нижней плоскости диска.

В полостях обоих дисков помещены диски *9* и *10*, сидящие на осях *11* и *12*. Оси *11* и *12* закреплены в игольчатых подпятниках и соединены между собою изогнутой тягой *13*, передающей вращающие моменты осей *11* и *12* друг другу. На оси *11* в нижней ее части закреплено зубчатое колесо *14*, сцепляющееся с шестеренкой *15*, сидящей на оси магнитной муфты *16*. На оси *11* закреплена также плоская спиральная пружинка, создающая уравновешивающий момент. Полость диска *3* заполнена эталонной жидкостью, с вязкостью которой сравнивается вязкость исследуемой жидкости.

Работа прибора состоит в следующем. Полость диска *2* заполнена испытуемой жидкостью, проникающей туда через отверстия *а*, а полость диска *3* — эталонной жидкостью, отделенной от испытуемой гидравлическим ртутным затвором. При вращении

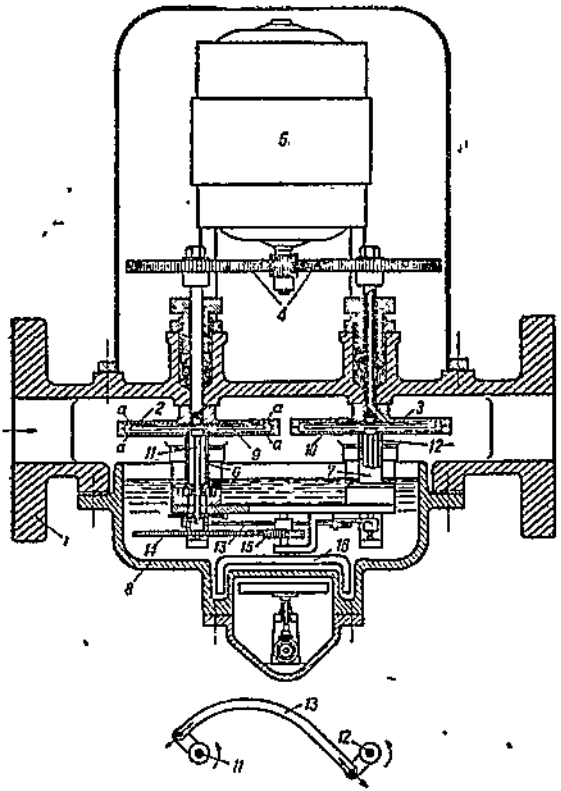


Рис. 262. Автоматический вискозиметр Кента:

1 — корпус вискозиметра; *2* и *3* — полые диски; *4* — зубчатая передача; *5* — электромотор; *6* и *7* — патрубки дисков; *8* — ртутная ванна; *9* и *10* — измерительные диски; *11* и *12* — оси измерительных дисков; *13* — соединительная тяга; *14* — зубчатое колесо; *15* — шестерня; *16* — магнитная муфта.

дисков *2* и *3* внутреннее трение жидкостей, наполняющих полости дисков, будет увлекать во вращение диски *9* и *10*.

Если вязкости обеих жидкостей равны, а направление вращения дисков *2* и *3* одинаково, то диски *9* и *10* останутся неподвижны, так как в тяге *13* возникнут равные по величине силы, направленные в диаметрально противоположном направлении.

Если вязкость исследуемой жидкости будет больше или меньше вязкости эталонной жидкости, то вращающий момент диска *9* окажется большим или меньшим вращающего момента диска *10* и в тяге *13* сила, развиваемая вращающим моментом диска *9*,

станет больше или меньше силы диска *10*. Разность этих двух сил заставит систему обоих дисков *9* и *10* поворачиваться вокруг своих осей до сех пор, пока эта разность не будет уравновешена силой закручивания или раскручивания спиральной пружинки на оси *11*.

Система придет в новое положение равновесия, причем угол поворота системы однозначно соответствует разности сил или, что то же, отношению вязкостей исследуемой и эталонной жидкости.

Влияние температуры автоматически компенсируется, так как диск с эталонной жидкостью находится в потоке исследуемой; благодаря большой поверхности теплообмена диска и малому объему эталонной жидкости в полости диска выравнивание температур происходит весьма быстро.

Поворот подвижной системы магнитной муфтой передается указывающей стрелке или перу регистрирующего устройства. Прибор может быть снабжен омическим или индукционным передатчиком.

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

ГЛАВА XV

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ О РЕГУЛИРОВАНИИ И РЕГУЛЯТОРАХ

60. Общие сведения о регулировании производственного процесса

Регулированием называется внешнее воздействие на какую-либо машину, аппарат или на процесс, протекающий в аппарате, с целью поддержания на постоянном уровне значения одной или нескольких физических величин, определяющих нормальную работу машины, аппарата или нормальный ход процесса. Такого рода регулирование носит название стабилизирующего регулирования. Поддержание постояного числа оборотов мешалки, постоянной температуры в теплообменнике, постоянного давления в автоклаве, постоянной плотности раствора, выходящего из концентратора, — все эти случаи являются примерами стабилизирующего регулирования.

Под термином регулирование понимают также воздействие на машину, аппарат или процесс, имеющее целью воспроизвести ряд последовательных действий машины или состояний процесса, после которого регулируемый объект возвращается к начальному состоянию. Такое регулирование называется циклическим.

Примерами циклического регулирования могут служить работа автоматической центрифуги, формовочного пресса для изготовления деталей из пластмасс, работа двухвального смесителя — пластикатора и т. п.

В химической промышленности чаще всего приходится прибегать к стабилизирующему регулированию.

Регулирование осуществляется либо ручным способом, когда все необходимые действия выполняются руками человека, либо автоматически, когда регулирующие действия выполняет система приборов и механизмов, независимо от участия человека. Устройство, состоящее из совокупности приборов и механизмов, выполняющее процесс регулирования, носит название регулятора.

Работа машины и аппарата определяется некоторыми постоянными величинами, характеризующими данную машину или аппарат, как-то: геометрические размеры, мощность, поверхность на-

грева или фильтрации, число и размеры тарелок и т. д. Эти величины называются параметрами объекта регулирования.

Далее работа машины или аппарата (а также установки, включающей несколько связанных между собою машин или аппаратов и выполняющей один производственный процесс) определяется рядом переменных величин, изменяющих свое значение в зависимости от внешних условий. Эти переменные величины могут быть разделены на три группы.

1) Переменные величины, характеризующие нормальную работу машины или ход процесса. Отклонение этих величин от заданного значения указывает на нарушение режима работы и определяет необходимость регулирующего воздействия. Эти переменные величины носят название показателей регулирования. Задача регулирования по отношению к этим величинам может заключаться либо в поддержании их возможно ближе к заданному значению (независимое регулирование), либо изменять их значение во времени (зависимое регулирование) по заданному закону (программное регулирование), либо, наконец, изменять значение показателя регулирования в зависимости от изменения другой переменной величины (связанное регулирование).

Примером программного регулирования может быть работа вулканизационного автоклава, где температура и давление в процессе вулканизации должны изменяться с течением времени определенным образом. Примером связанного регулирования является регулирование горения в топке, где при изменении количества или качества поступающего топлива должно изменяться количество подаваемого в топку воздуха.

2) Переменные величины, значение которых можно и необходимо менять, в пределах, определяемых параметрами объекта, для восстановления нормального значения показателя регулирования. Эти величины носят название регулируемых агентов. В теплообменнике, назначение которого нагревать до определенной температуры жидкость или газ, регулируемым агентом будет теплоноситель (пар, газ, жидкость), осуществляющий обогрев. При отклонении температуры нагреваемого вещества от заданной величины необходимо изменить в ту или другую сторону подачу теплоносителя для восстановления заданной температуры нагрева. Понятно, что пределы изменения подачи определяются конструктивными размерами (параметрами) данного теплообменника.

3) Переменные величины, изменяющие свое значение произвольно от различных внешних причин, не находящихся под контролем и нарушающие своим изменением нормальное течение процесса. Эта группа переменных величин носит название возмущающих агентов, а влияние их на ход процесса называется возмущением.

Так, например, процесс, протекающий в выпарном аппарате, терпит возмущение от изменения концентрации поступающего на выпаривание раствора, от изменения давления греющего пара, от

изменения давления вторичного пара в аппарате. Все эти факторы будут возмущающими агентами для выпарного аппарата, изменяя значение показателя регулирования, каким в этом случае будет плотность (концентрация) упаренного раствора.

Все сказанное относится к стабилизирующему регулированию, наиболее распространенному в химических производствах.

Циклическое регулирование имеет наиболее широкое применение в металлообрабатывающих машинах-автоматах и других механических производствах. Циклическая регулировка чисто химико-технологического процесса имеет место в автоматическом регулировании работы генераторов водяного газа.

Циклическое регулирование осуществляет непрерывно повторяющийся рабочий цикл машины или аппарата, состоящий из отдельных, следующих в определенном неизменном порядке операций. Длительность отдельных операций и всего рабочего цикла определяется заранее установленными промежутками времени. Длительность некоторых операций, входящих в рабочий цикл, иногда определяется перемещением какой-либо детали машины или наступлением определенного позиционного положения деталей. В том и другом случае работа регулятора не связана с физико-химическими показателями самого процесса и его качественными результатами. Это является отличительной особенностью циклического регулирования.

Любой объект регулирования обладает свойством в большей или меньшей степени самостоятельно приходить после возмущения к новому состоянию равновесия. При этом показатель регулирования принимает новое значение, отличное от заданного, но остающееся постоянным до нового возмущения. Это свойство называется выравниванием.

Свойство выравнивания чрезвычайно ценно тем, что облегчает работу регулятора. При отсутствии выравнивания всякое возмущение, даже самое малое, приводило бы к неограниченному возрастанию или убыванию значения показателя регулирования.

Кроме свойства выравнивания на процесс регулирования оказывает влияние так называемая инерция регулируемой машины или аппарата. Инерция регулируемой системы, т. е. наличие в системе массы или емкости, накопляющих энергию или вещество, приводит к тому, что нарушение равновесного состояния объекта регулирования не отражается мгновенно на показателе регулирования, значение которого начинает изменяться постепенно, приближаясь к новому равновесному значению.

Инерция в общем случае улучшает динамические свойства регулируемой машины или аппарата, повышая их устойчивость против возмущения. После действия возмущающего агента проходит некоторое время, прежде чем величины отклонений показателя регулирования от нормального значения станут заметными. Тем не менее, скорость изменения показателя регулирования непосредственно после возмущения становится отличной от нуля и конечной величиной.

В других случаях инерция системы влияет так, что после возмущения должно пройти известное время до начала изменения значения показателя регулирования. Скорость изменения показателя регулирования вначале равна нулю и становится конечной лишь по истечении некоторого промежутка времени. Это явление называется запаздыванием и в зависимости от величины вносит известное усложнение в работу регулятора. К запаздыванию объекта регулирования добавляется запаздывание самого регулятора и при достаточной величине суммарного запаздывания работа регулятора становится весьма неточной, так как показатель регулирования в большой мере теряет значение сигнализатора отклонения процесса от нормы.

Ожидаемый и возможный в эксплоатации диапазон изменений возмущающих агентов называется пределом возмущений.

Возмущения могут быть временные, продолжительные и периодические.

Временные возмущения отличаются тем, что через короткий промежуток времени возмущающий агент возвращается к первоначальному значению и равновесие восстанавливается само собой, не требуя регулировки. Продолжительные возмущения могут значительно отклонить систему или процесс от нормы и требуют соответственных мероприятий для возвращения их к норме.

Наиболее опасны периодические возмущения, возникающие, например, от работы поршневого насоса или действия смежного регулятора. Такого рода пульсирующие возмущения могут вызвать раскачивание регулятора и сделать невозможным регулирование.

Предел возможных изменений регулируемого агента называется пределом регулирования. Пределы регулирования во всех случаях должны перекрывать пределы возмущений, так как иначе при крайних значениях предела возмущений регулирование окажется неосуществимым.

Регулирование может поддерживать значение показателя регулирования в определенных узких пределах. Предельные отклонения показателя регулирования от заданной величины составляют погрешность регулирования.

Различают длительную допустимую погрешность регулирования и временно допустимые отклонения, которые могут быть больше длительно допустимой погрешности, но ограничены не только по величине, но и по времени. Пределы возмущений, пределы регулирования и погрешность регулирования являются важными характеристиками объекта регулирования.

61. Принципы устройства и характеристика регулятора

Автоматический регулятор, как определялось выше, есть совокупность приборов и механизмов, выполняющих работу регулирования.

Во всяком регуляторе можно различать два основных узла: измерительно-координирующее устройство и исполнительный механизм.

Измерительно-координирующим устройством называется часть регулятора, измеряющая величину отклонения показателя регулирования от заданной величины и координирующая работу остальных элементов регулятора в зависимости и в соответствии с этим отклонением.

Исполнительным механизмом регулятора является часть его, непосредственно воздействующая на регулируемый агент, изменяя его значение в соответствии с отклонением показателя регулирования.

Те системы регуляторов, в которых работа исполнительного механизма выполняется за счет энергии, непосредственно полученной от измерительно-координирующего устройства, или, что то же, в которых измерительно-координирующее устройство и исполнительный механизм объединены в одно целое, называются регуляторами прямого действия.

Регуляторы, работа исполнительного механизма которых выполняется за счет энергии, полученной от постороннего источника, называются регуляторами непрямого действия.

Характеристикой регулятора называется зависимость между положением регулирующего органа и значением показателя регулирования. В общем случае характеристика регулятора представляет собой кривую, наклонную к оси абсцисс, как это показано на рис. 263. Чем меньше наклон кривой, тем регулирование менее точно, так как при этом малому перемещению регулирующего органа соответствует большое изменение значения показателя регулирования.

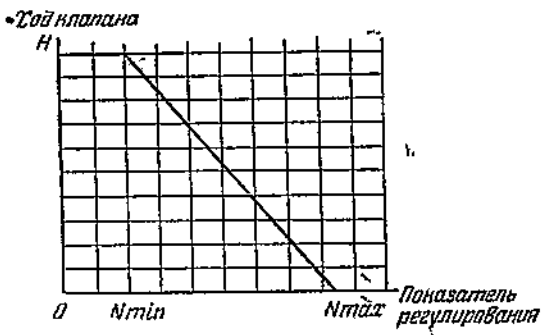


Рис. 263. Характеристика регулятора.

Степенью неравномерности регулятора называется величина

$$\delta = \frac{n_{макс} - n_{мин}}{n_{ср}} 100, \qquad (245)$$

где δ — степень неравномерности регулятора в %;

$n_{макс}$ — максимальное значение показателя регулирования;

$n_{мин}$ — минимальное значение показателя регулирования;

$n_{ср}$ — среднее значение показателя регулирования, равное

$$\frac{n_{макс} + n_{мин}}{2}.$$

Степень неравномерности выражает относительное изменение показателя регулирования, соответствующее полному перемещению регулирующего органа.

Регуляторы, у которых $\delta = 0$, называются **астатическими**. У таких регуляторов малейшее изменение показателя регулирования переводит регулирующий орган в одно из крайних положений.

Астатический регулятор является одновременно **двухпозиционным**, так как допускает только два положения регулирующего органа: «**открыто**» — «**закрыто**». Этот тип регулятора пригоден лишь для объектов регулирования, обладающих большой инерцией. В применении к малоинерционным системам астатический регулятор будет работать весьма неспокойно и может привести систему к раскачиванию.

Регуляторы со степенью неравномерности выше нуля называются **статическими**.

Пример **астатического регулятора** давления приведен на рис. 264.

Такой регулятор представляет собой мембранный клапан, регулирующий давление в точке *2* трубопровода (за клапаном). При повышении давления мембрана *1* преодолеет сопротивление

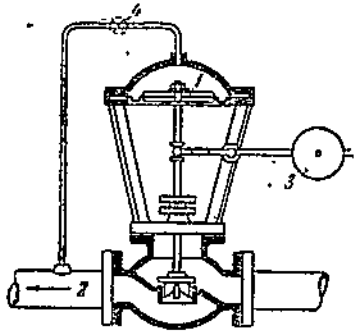


Рис. 264. Астатический регулятор:

1 — измерительная мембрана; *2* — отбор давления; *3* — уравновешивающий груз; *4* — дросселирующий вентиль.

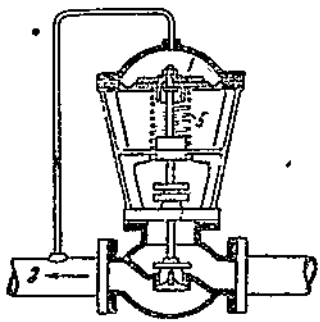


Рис. 265. Статический регулятор:

1 — измерительная мембрана; *2* — отбор давления; *5* — регулирующая пружина.

груза *3* и закроет клапан; при понижении давления груз *3* полностью откроет клапан.

Регулирование можно сделать более устойчивым, поместив на трубке, подающей давление на мембрану, дросселирующий вентиль *4*.

Перемещение регулирующего органа будет происходить замедленно.

Такой тип регулятора носит название **астатического замедленного действия**.

Пример **статического регулятора** давления приведен на рис. 265.

Этот регулятор отличается от предыдущего тем, что груз *3* заменен пружиной *5*.

Так как сила пружины пропорциональна ее сжатию, в этом регуляторе каждому значению давления будет соответствовать свое определенное положение клапана.

Чувствительностью регулятора называется величина изменения показателя регулирования, вызывающая действие регулятора, т. е. перемещение регулирующего органа. Чувствительность регулятора зависит от величины трения частей регулирующего устройства, зазоров в кинематических парах регулятора и т. п.

В системе: регулятор — объект регулирования, часто могут в процессе регулировки возникать колебания. Если во времени амплитуда колебаний убывает, стремясь к нулю, процесс регулирования будет устойчивым.

При стабильной амплитуде колебаний или при стремлении амплитуды колебаний к возрастанию регулирование является неустойчивым и фактически не достигает своей цели.

Для создания во всех случаях устойчивого регулирования в регуляторах непрямого действия применяется особое устройство, называемое обратной связью.

Кроме того, в систему регуляторов непрямого действия вводится промежуточное звено, называемое реле и служащее для управления внешним источником энергии, питающей исполнительный механизм регулятора.

Назначение механизма обратной связи заключается в замедлении и ограничении перестановки регулирующего органа, что создает более спокойный и плавный подвод системы к равновесию.

Общая схема регулятора непрямого действия с обратной связью изображена на рис. 266.

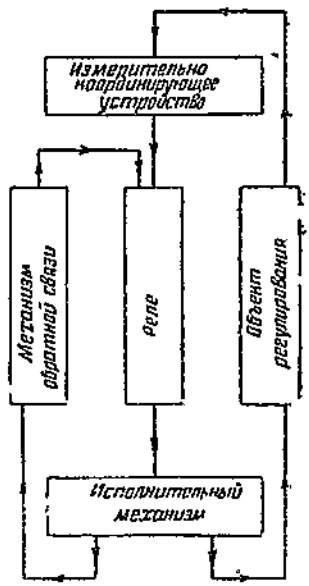


Рис. 266. Схема взаимодействия частей регулятора.

Направление воздействия частей регулятора указано на рис. 266 стрелками на линиях, представляющих связи частей регулятора.

Регуляторы этого типа называются простыми регуляторами непрямого действия в отличие от сложных, особенностью которых является многоступенчатое воздействие на регулируемый агент.

62. Виды регуляторов

Простейший пример *сложного регулятора* представлен на рис. 267. В данном регуляторе линия подачи регулируемого агента разделена на две ветви, *I* и *II*, и в каждую ветвь включен исполнительный механизм, работающий от своего реле.

Измерительно-координирующее устройство имеет два отличающихся установочных значения показателя регулирования.

Каждый исполнительный механизм двухпозиционный и может полностью включать или выключать часть общего расхода регулируемого агента. Измерительно-координирующее устройство воздействует на первое реле при определенном значении показателя и на второе реле при другом большем значении. Пока значение показателя лежит у верхнего предела, регулирование осуществляется вторым реле. Первое реле выключено и соответствующий ему исполнительный механизм находится в положении «*закрыто*». При падении значения показателя до нижнего предела включится первое реле и первый исполнительный механизм откроет дополнительную подачу регулируемого агента к объекту; регулирование в этом случае будет выполняться первым реле. Второй исполнительный механизм в это время будет оставаться полностью открытым. Подобные регуляторы называются *трехпозиционными*, так как позволяют осуществлять три различных подачи регулируемого агента: минимальную, нормальную и максимальную.

Трехпозиционное регулирование уменьшает амплитуду колебаний показателя регулирования по сравнению с двухпозиционными регуляторами и повышает пределы регулирования. Увеличивая степень позиционности и уменьшая одновременно пределы изменений регулируемого агента в каждой ступени, можно получить регуляторы с еще более устойчивой и плавной работой. Известны пяти- и шестипозиционные регуляторы. Следует отметить, что увеличение позиционности достигается за счет значительного усложнения конструкции, поэтому при необходимости иметь большое число позиций регулирующего органа выгоднее применять статические регуляторы.

Одной из разновидностей астатических регуляторов со сложной характеристикой является *шаговой* регулятор. В шаговом регуляторе при отклонении значения показателя регулирования от заданной величины измерительно-координирующее устройство воздействует на реле, посылающее исполнительному механизму короткий импульс, переставляющий регулирующий орган на небольшую долю полного хода. Через определенный интервал времени реле посылает новый импульс в том же направлении до тех пор, пока значение показателя не возвратится к норме. Работа регулятора прерывистая, включающая поочередно периоды регулирования (перестановка регулирующего органа) и периоды выжидания.

Астатический шаговой регулятор можно рассматривать, как разновидность регулятора с замедленным движением. Если в схеме регулировки, изображенной на рис. 267, включить различные исполнительные механизмы: один двухступенчатый, а другой замедленного действия, а измерительно-координирующему устройству задать одно значение показателя, при переходе через которое будут срабатывать оба реле, то получится новый вид сложного регулятора. Двухступенчатый исполнительный механизм может резко изменить некоторую часть подачи регулируемого агента, а замедленный полную величину подачи. При повышении значения показателя двухпозиционный механизм мгновенно выключит часть подачи, а механизм замедленного действия начнет постепенно уменьшать подачу до приведения значения показателя к норме. При понижении значения показателя против заданного двухпозиционный механизм сразу включит часть подачи, а механизм замедленного действия постепенно отрегулирует остальную часть подачи до приведения показателя к заданной величине. Регуляторы этого типа называются *замедленно-ступенчатыми* или *двухмоторными*.

Поместив в разветвление подачи регулируемого агента статический и астатический замедленного действия исполнительные ме-

жанизмы, (рис. 268), получим так называемый изодромный регулятор.

Отличительной особенностью этого регулятора, обусловливающей его название, является его способность точно поддерживать заданное значение показателя регулирования при всех изменениях нагрузки.

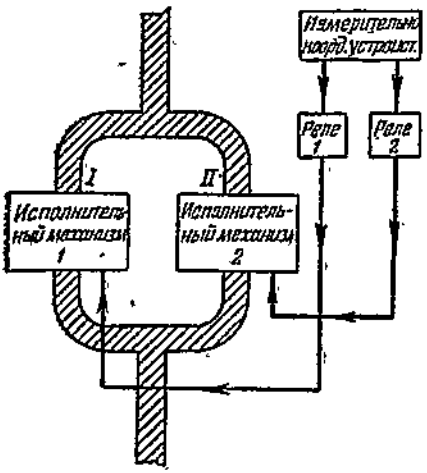


Рис. 267. Принципиальная схема сложного регулятора.

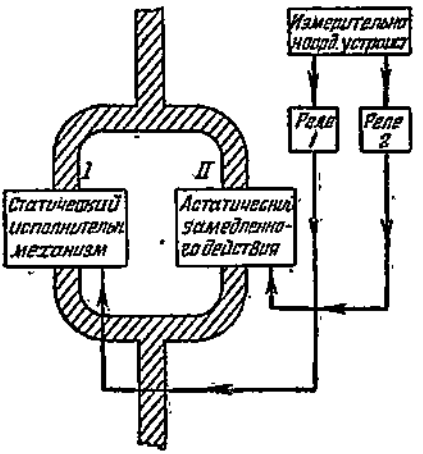


Рис. 268. Принципиальная схема изодромного регулятора.

Исполнительные механизмы этого регулятора установлены так, что при заданном значении показателя регулирования подача регулируемого агента через оба регулирующие органа соответствует расходу объекта регулирования, причем статический механизм удерживает свой регулирующий орган в среднем положении.

Если равновесие нарушится, например расход объекта регулирования уменьшится и значение показателя регулирования начнет возрастать, статический исполнительный механизм начнет уменьшать подачу. В результате повышение показателя регулирования замедлится; соответственно замедлится и перестановка статического исполнительного механизма. Процесс будет продолжаться до остановки показателя регулирования на некотором значении, отличающемся от заданного. Следствием этого будет срабатывание второго реле, которое заставит исполнительный механизм замедленного действия постепенно уменьшить подачу. Значение показателя начнет уменьшаться, приближаясь к заданному, но одновременно начнет перемещаться статический исполнительный механизм, жестко связанный со значением показателя, увеличивая подачу, т. е. действуя обратно действию замедленного исполнительного механизма.

В результате значение показателя регулирования будет плавно, без раскачивания, подведено к норме. К концу процесса регулирования статический механизм вернется к исходному положе-

нию (регулирующий орган в среднем положении), а астатический исполнительный механизм замедленного действия изменит свое положение соответственно новому значению расхода объекта регулирования.

Все описанные регуляторы ведут регулирование по величине и направлению отклонения показателя регулирования от заданной величины.

Существуют также регуляторы, ведущие регулирование по скорости изменения показателя регулирования. Такие регуляторы являются регуляторами по первой производной.

Регуляторы этого класса могут быть построены по любому из принципов описанных регуляторов, т. е. в классе регуляторов по первой производной могут существовать все основные разновидности регуляторов первого класса.

Если связь между скоростью изменения показателя регулирования и изменением положения регулирующего органа пропорциональна, т. е. чем выше скорость отклонения показателя, тем больше перестановка клапана, — то подобный регулятор называется пропорциональным по первой производной.

Если со скоростью изменения показателя связана (по величине или по знаку) скорость перемещения клапана, такой регулятор называется замедленным астатическим по первой производной.

Если, наконец, открытие клапана изменяется на одну и ту же определенную величину при изменении скорости отклонения показателя, то такой регулятор называется ступенчатым по первой производной.

Регулирование по первой производной должно обязательно сочетаться с каким-либо видом обыкновенного регулирования — астатическим или статическим, иначе в результате работы регулятора показатель может стать постоянным, но недопустимо отличным от заданной величины.

Возможны регуляторы, работающие по второй производной $\frac{d^2Q}{dt^2}$, т. е. начинающие действовать, когда изменение показателя регулирования приобретает ускорение. Этот класс регуляторов в настоящее время очень мало разработан и не имеет применения в промышленности.

ГЛАВА XVI

ЭЛЕМЕНТЫ И ДЕТАЛИ РЕГУЛЯТОРОВ

63. Регулирующие органы

Регулирующим органом называется часть регулирующего устройства, непосредственно воздействующая на регулируемый агент.

При стабилизирующем регулировании в химических производствах регулируемыми агентами являются потоки жидкостей, газов и паров; поэтому основными видами регулирующих органов в химических производствах будут запорные детали трубопроводов: заслонки, задвижки, клапаны и краны.

Регулирующие заслонки. Заслонки в регулирующих устройствах применяются почти исключительно круглые, проходные. Проходные заслонки легче пригоняются и дают лучшее запирание особенно при загрязненных газах, так как проходная заслонка сдвигает налеты в сторону и не так склонна к заклиниванию, как заслонка с упорами или заслонка эллиптическая. Дроссельная заслонка представляет собой весьма несовершенный регулирующий орган, так как соотношение между углом поворота заслонки и приростом сечения, открываемого заслонкой, выражается сложной функцией. На рис. 269 представлена кривая, выражающая эту зависимость. Кривая показывает, что при хорошо пригнанной заслонке приращение сечения в начале хода заслонки весьма мало и основное открытие сечения протекает между 45 и 80° поворота. При полностью открытой заслонке сужение сечения трубопровода составляет около 32%.

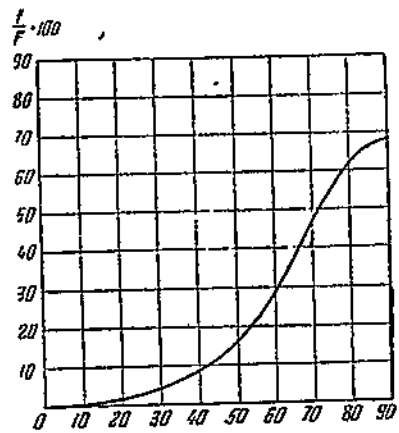


Рис. 269. Прирост сечения, открываемого заслонкой.

Работа перестановки заслонки затрачивается на преодоление трения в связях, шарнирах и сальниках оси и на преодоление реакции потока, протекающего через заслонку.

При закрытой заслонке нагрузка на нее равна полной разности давлений, умноженной на площадь заслонки.

Эта сила воспринимается только подшипниками. При большем диаметре заслонки ось ее должна быть проверена на эту нагрузку во избежание изгиба оси и защемления ее в подшипниках.

Давление на обе половины заслонки уравновешено только при полном ее закрытии. При всяком другом положении возникает некоторый вращающий момент, стремящийся закрыть заслонку.

Равнодействующая давления на заслонку приложена к половине заслонки, направленной против потока на расстоянии s от оси заслонки (рис. 270).

Величина равнодействующей P пропорциональна сечению трубопровода и разности давлений h и, кроме того, зависит от угла поворота заслонки. В свою очередь s также представляет некоторую функцию угла α и зависит от диаметра трубопровода.

Можно написать:

$$P = a_1 d^2 h, \tag{246}$$

где $a_1 = f_1(\alpha)$ и

$$s = a_2 d, \tag{247}$$

где $a_2 = f_2(\alpha)$.

Момент вращения будет равен:

$$Ps = a_1 a_2 h d^3 = a h d^3, \tag{248}$$

где $a = f(\alpha)$.

Зависимость величины a от угла поворота заслонки α представлена кривой на рис. 271.

Перепад давления h должен при этом определяться как сумма статического и динамического напора. При вполне открытой заслонке имеет место только динамический перепад, при вполне закрытой только статический перепад.

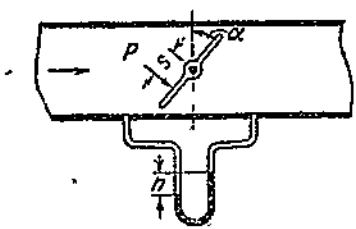


Рис. 270. Схема усилий, действующих на заслонку.

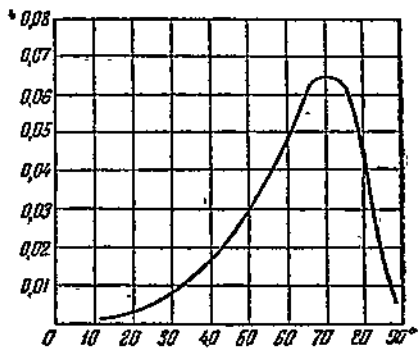


Рис. 271. Значения коэфициента a.

В положении, близком к закрытию, особенно при загрязненных газах, большинство заслонок через некоторое время начинает итти очень туго. Поэтому вблизи положения закрытия должен быть обеспечен значительный избыток перестановочной силы. Это удобнее всего получить, применяя кривошипный привод с максимальным плечом силы вблизи положения закрытия.

Задвижки. Задвижки, равно как и заслонки, применяются для регулирования газовых потоков при небольших перепадах давлений.

Задвижки в прямоугольных каналах дают простую линейную зависимость между перемещением задвижки и приростом сечения. Однако существующие задвижки в большинстве случаев чрезмерно велики и дают действительное дросселирование потока, а следовательно, регулирование только

на первой трети своего хода. Дальнейшее движение задвижки не оказывает почти никакого действия. Поэтому при автоматическом регулировании нужно рассчитывать исполнительный механизм на передвижение задвижки на половину хода.

Перестановочная сила определяется в основном трением в направляющих, которые должны воспринимать нагрузку на поверхность задвижки от разности давлений. Эта нагрузка будет иметь максимальную величину при почти закрытой задвижке.

Клапаны. Клапаны являются наиболее широко применяемым регулирующим органом, пригодным для любых перепадов давлений. Для двухпозиционных регуляторов форма клапана и его характеристика не играют никакой роли и в этом случае важна лишь его пропускная способность.

В многопозиционных регуляторах характеристика клапана имеет решающее значение и неправильный выбор и расчет регулирующего клапана чаще всего является причиной неудовлетворительной работы регулятора.

Основное условие, которому должна удовлетворять характеристика многопозиционного клапана, — это постоянное соотношение между приращением хода клапана (в % от полного хода) и приращением расхода через клапан.

Пусть, например, при подъеме клапана на 15% полного хода клапан пропускает 10% полного расхода. При перестановке клапана в новое положение, соответствующее 25% полного хода, расход увеличился на 25%, т. е. составил $10 \cdot 1{,}25 = 12{,}5\%$.

Тогда при перестановке клапана на 10% хода (25—15) в любом месте полного хода расход должен увеличиваться на 25% своей величины.

Если при 70% хода клапан пропускает 60% расхода, то в положении 80% хода он должен пропустить на 25% больше, т. е. $60 \cdot 1{,}25 = 75\%$ расхода.

Характеристике с постоянным соотношением хода клапана и потока через него удовлетворяют два вида кривых: параболическая и логарифмическая. Выбор той или другой характеристики определяется характером регулируемого потока.

Процесс можно характеризовать амплитудой изменения подачи регулируемого агента, поддерживающей постоянное значение показателя регулирования, т. е. отношением максимального и минимального расхода через клапан:

$$F_2 = \frac{Q_{max}}{Q_{min}}. \qquad (249)$$

Процесс можно характеризовать также отношением максимального и минимального перепада давлений, обеспечивающих протекание потока через клапан:

$$P_2 = \frac{p_{1max} - p_{2min}}{p_{1min} - p_{2max}}, \qquad (250)$$

где

P_2 — отношение перепадов;

p_{1max} — наибольшее давление перед клапаном;

p_{1min} — наименьшее давление перед клапаном;

p_{2max} — наибольшее давление за клапаном;
p_{2min} — наименьшее давление за клапаном.

Из уравнения (250) вытекает, что при всех условиях $p_{1min} > p_{2max}$, так как иначе P_2 становится отрицательным или равным ∞. Обозначим отношение максимального регулируемого расхода к нерегулируемой его части через v_2, тогда:

$$v_2 = \frac{100}{x_0}, \qquad (251)$$

где x_0 — процент расхода, который клапан не может регулировать.

Отношение v_2 назовем диапазоном регулирующего клапана.

Диапазон клапана v_2 характеризует отношение расходов при определенном перепаде давлений в клапане. При изменении перепада соответственно изменится отношение v_2.

Так как соотношение расходов при одном и том же проходном сечении пропорционально корню квадратному из отношения перепадов, то можно написать:

$$\frac{v_2}{F_2} = \sqrt{P_2} \qquad (252)$$

или

$$v_2 = F_2 \sqrt{P_2}. \qquad (253)$$

В зависимости от числового значения v_2, в каждом отдельном случае можно выбрать параболическую или логарифмическую характеристику клапана.

Параболическая характеристика клапанов. Уравнение параболы:

$$y^2 = Ax, \qquad (254)$$

где y — ход клапана в % от полного хода;

x — расход регулируемого агента через клапан в % полного расхода;

A — постоянная.

Если принять, что истечение происходит при постоянном перепаде и постоянном коэфициенте расхода, то расход будет прямо пропорционален живому сечению отверстия клапана.

Таким образом, x будет обозначать площадь сечения в % от полной площади.

Треугольник обладает требуемой зависимостью между высотой и площадью, поэтому проходные отверстия клапанов с параболической характеристикой выполняются в виде треугольных вырезов в цилиндрических стенках плунжерного клапана. Клапаны обычно выполняются двухседельными с двумя треугольными вырезами в каждом ярусе. При четырех окнах в клапане можно написать:

$$x = \frac{4by}{2} = y^2, \qquad (255)$$

где b — длина основания каждого треугольного окна. Равенство (255) удовлетворяется при $b = \frac{v}{2}$. Постоянная A определяется из условия, что при $y = 100\%$, $x = 100\%$:

$$A = \frac{100^2}{100} = 100. \tag{156}$$

Отсюда основное уравнение (254) будет иметь вид:

$$y^2 = 100\ x. \tag{257}$$

Исследование этого уравнения показывает, что при малых значениях y приращение x во много раз меньше, чем при больших значениях y.

Этот недостаток исправляют переносом вершины параболы на некоторое расстояние от начала координат. Этот перенос равносилен тому, что при $y = 0$ $x \neq 0$, т. е. при вполне закрытом клапане существует некоторый расход регулируемого агента через клапан.

Экспериментально установлено, что условия пропорциональности хорошо соблюдаются при начальном расходе $x_0 = 8\%$.

Уравнение кривой примет вид:

$$y^2 = A\ (x - x_0). \tag{258}$$

Постоянная A из условия, что при $y = 100\%$ $x = 100\%$ будет равна:

$$A = \frac{100^2}{100 - x_0}. \tag{259}$$

Принимая $x_0 = 8\%$, получим:

$$A = \frac{100^2}{100 - 8} = 108{,}7. \tag{260}$$

Уравнение (258) примет вид:

$$y^2 = 108{,}7\ (x - 8), \tag{261}$$

откуда

$$x = \frac{y^2}{108{,}7} + 8. \tag{262}$$

Равенство (262) может служить для подсчета площадей. Задаваясь последовательно значениями y, получим соответственные величины x в %; зная же максимальное сечение клапана, легко получить значения x в единицах площади.

Полный ход клапана определится из формулы:

$$y = \sqrt{x - x_0}, \tag{263}$$

где y, x и x_0 берутся в абсолютных цифрах, а не в %.

Для данного клапана диапазон регулирования:

$$v_2 = \frac{100}{8} = 12{,}5. \tag{264}$$

Первые 8% расхода клапан не регулирует. Для пропуска нерегулируемой части расхода в дне плунжера клапана сверлятся отверстия, составляющие 8% полного сечения при открытом клапане.

На рис. 272 дана кривая характеристики этого клапана.

Логарифмическая характеристика клапанов. В случае необходимости увеличить диапазон клапана необходимо прибегнуть к клапану с логарифмической характеристикой:

$$y = C \lg Ax, \tag{265}$$

где y — ход клапана в % от полного хода;

x — расход регулируемого агента в % от полного расхода или площадь сечения прохода клапана в % от полного сечения;

A и C — постоянные величины.

При $x = 0$ $y = -\infty$, т. е. и этот клапан не может регулировать поток, начиная с нуля.

По опытным данным американских фирм утечка при закрытом клапане может быть сведена до 1—2%.

Принимая $x_0 = 2\%$, определим значения постоянных при двух условиях:

1) при $y = 0$ $x = x_0$ и

2) при $y = 100$ $x = 100$

из первого условия:

$$\lg A + \lg x = \frac{y}{C}. \tag{266}$$

Откуда:

$$\lg A = \frac{y}{C} - \lg x = \frac{0}{C} - \lg x_0 = -\lg x_0 \tag{267}$$

или:

$$A = \frac{1}{x_0}, \tag{268}$$

но так как

$$x_0 = \frac{100}{v_2}, \quad \text{то} \quad A = \frac{v_2}{100}. \tag{269}$$

Из второго условия:

$$C = \frac{y}{\lg Ax} = \frac{100}{\lg 100A} = \frac{100}{\lg 100 \cdot \frac{v_2}{100}} = \frac{100}{\lg v_2}. \tag{270}$$

Таким образом, обе постоянные являются функциями величины v_2 диапазона клапана, а последняя определяется характером регулируемого процесса.

Зависимость между ходом клапана и изменением проходного сечения определяется из основного уравнения (265). Откуда

$$\lg Ax = \frac{y}{C} \tag{271}$$

и

$$Ax = 10^{\frac{y}{C}} \tag{272}$$

а

$$x = \frac{10^{\frac{y}{C}}}{A} \qquad (273)$$

Заменяя в последнем равенстве A и C их значениями из (269) и (270), получим:

$$x = \frac{100}{v_2} \cdot 10^{\frac{y \lg v_2}{100}} \qquad (274)$$

Уравнение (274) позволяет вычислить последовательные значения x в % подстановкой в него последовательных значений y в %.

Зная величину сечения полного прохода клапана в единицах площади, а величину хода в линейных единицах, легко получить ширину окна b на любом данном участке клапана.

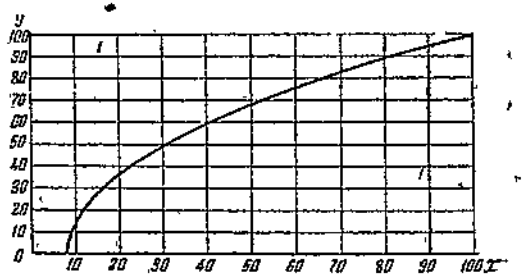


Рис. 272. Параболическая характеристика клапана.

Суммарная площадь сечения распределяется обычно между четырьмя окнами (по два окна в каждом ярусе двухседельного клапана).

Если все четыре окна выполнить одинаковыми, то проходное отверстие каждого окна в начале хода клапана (у вершины окна) будет весьма мало, что невыгодно как с производственной, так и с гидравлической точки зрения. Поэтому окна располагают на разной высоте.

I окно вступает в работу по прошествии 5% хода, II окно — по прошествии 20% хода, III окно — по прошествии 35% хода и IV окно — по прошествии 50% хода.

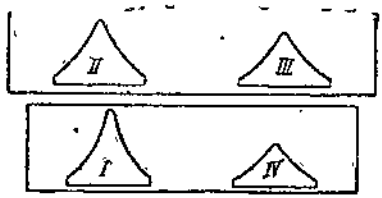


Рис. 273. Разбивка окон на двухседельном плунжерном клапане.

На рис. 273 изображена в развертке разбивка окон на двухседельном плунжерном клапане.

Плунжер строится с запасом хода в 10%, причем на этих 10% отверстия делаются прямоугольными.

Распределение суммарной площади прохода между четырьмя окнами удобнее всего выполняется графически.

По уравнению (274) вычисляется боковой профиль суммарной площади, который вычерчивается в увеличенном масштабе 3 : 1 или 5 : 1.

На оси ординат отмечаются точки 5, 20, 35 и 50% хода. Абсцисса на длине суммарной ширины отверстия OB делится на четыре равных части:

$$BD = DE = EF = FO.$$

Точка A начала кривой отстоит от оси ординат на расстоянии нерегулируемой части потока. По кривой AB вырезают шаблон, который последовательно совмещают точкой A шаблона с точками G, H, I так, чтобы кривая шаблона проходила через точки D, E, F на оси абсцисс, и проводят по шаблону кривые GD, HE, IF (рис. 274). Горизонтали, проведенные параллельно оси абсцисс, пересекаясь с кривыми, дадут сразу ширины соответствующих окон в данной точке хода. Так, например, горизонталь $O'B'$, проведенная на 80% хода клапана, дает ширину I окна $B'D'$, II окна $D'E'$, III окна $E'F'$ и IV окна $F'O'$.

Для малых клапанов $d<25$ *мм* вместо выреза отверстий профилируют по полученной кривой цилиндрическую часть плунжера клапана (рис. 275). Проходное сечение при этом будет иметь форму сегмента круга.

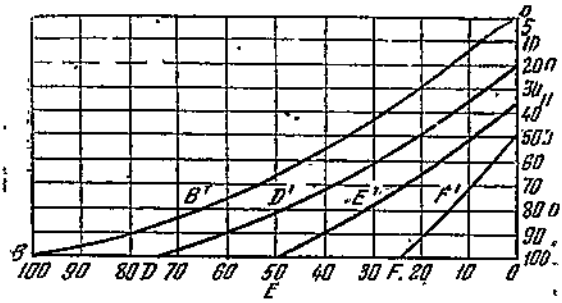


Рис. 274. Графическое построение окон клапана логарифмической характеристики.

Расчет регулирующего клапана. Для правильного регулирования необходимо, чтобы сопротивление регулирующего клапана при полном открытии было больше сопротивления линии трубопровода с арматурой и фитингами, так как только при этом условии действительная кривая расхода через клапан приближается к его теоретической характеристике. При расходе, меняющемся в широких пределах, сопротивление клапана может быть выбрано равным сопротивлению трубопровода; при малых колебаниях расхода сопротивление регулирующего клапана должно быть взято в 2—3 раза большим сопротивления линии.

Проходное сечение клапана принимается равным половине площади условного прохода:

$$F_{сум} = 0{,}5\frac{\pi D^2}{4}, \qquad (275)$$

а с учетом 10% запаса:

$$F_{сум} = 0{,}55\frac{\pi D^2}{4}. \qquad (276)$$

Скорость подхода струи к окнам должна быть примерно равна скорости потока в окнах. При этом условии диаметр стержня плунжера (рис. 276) будет:

$$d = \sqrt{D_0^2 - 0{,}5\,D^2}. \qquad (277)$$

Номинальный диаметр клапана определяется по формулам:
для жидкостей:

$$D = \sqrt{\frac{V}{128}\sqrt{\frac{\gamma}{h}}}, \qquad (278)$$

для пара:

$$D = \sqrt{\frac{W}{233\sqrt{h\gamma}}}. \qquad (279)$$

для газа:

$$D=\sqrt{\frac{Q}{220}\sqrt{\frac{\gamma}{hp_2}}}. \qquad (280)$$

В этих формулах:
D — номинальный диаметр регулирующего клапана в дюймах;
V — расход жидкости в *л/мин*;
Q — расход газа или воздуха в *м³/час*;
W — расход пара в *кг/час*;

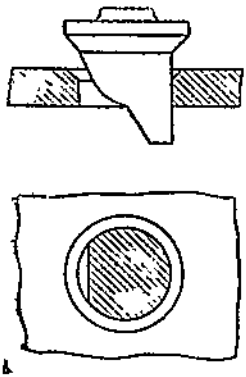


Рис. 275. Профилирование плунжера клапана малого диаметра.

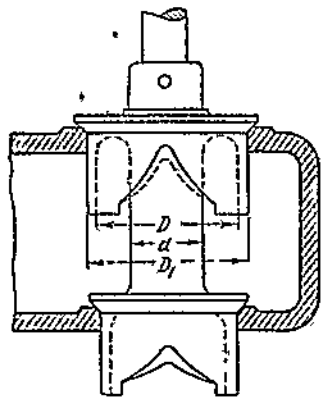


Рис. 276. Двухседельный клапан с логарифмической характеристикой.

γ — удельный вес протекающего агента (для жидкостей — вода 1,0; для газов — воздух 1,0; для пара $\gamma = г/дм^3$ на выходе из клапана);
h — минимальный перепад давления в клапане в *кг/см²*, равный $p_1 - p_2$;
p_2 — абсолютное давление на выходе из клапана в *кг/см²*;
p_1 — абсолютное давление перед клапаном в *кг/см²* (для газа и пара, если $p_2 < 0{,}5\ p_1$, в формулы надо вставлять $p_2 = 0{,}5\ p_1$).

Диаметр клапана D должен быть по крайней мере вдвое меньше диаметра трубопровода. Если $D \geqslant 0{,}75\ D_{тр}$, то регулирование становится затруднительным и ненадежным.

Ход расчета регулирующего клапана следующий:
1) Определяется по одной из формул (278, 279, 280) номинальный диаметр клапана.
2) После определения номинального диаметра вычисляется амплитуда потока F_2 и перепад давлений P_2.
3) Вычисляется диапазон клапана V_2.
4) Определяется начальная утечка x_0 и константы A и C.
5) Устанавливается суммарная площадь сечения $F_{сум}$ (формула 276) и ход клапана y_{max}.

6) Вычисляется изменение суммарной площади по ходу клапана.
7) Строится профиль отверстий плунжера.

64. Измерительно-координирующие устройства

В качестве измерительно-координирующего устройства может быть применен любой контрольно-измерительный прибор, способный создать в результате измерения механический или электрический импульс достаточной силы для перестановки регулирующего органа или для действий реле.

Однако конструктивно удобнее в регулирующих устройствах применять специальные виды измерительно-координирующих устройств, тем более, что в ряде случаев на регулятор не возлагается функция измерения показателя регулирования, т. е. выражения его значения в числовой величине, а лишь поддержание его значения неизменным во времени.

Таким образом, в измерительно-координирующем устройстве регулятора может отсутствовать указывающая и регистрирующая части.

Измерение количества материалов, соотношения, уровня, температуры может быть сведено к измерению давления. Поэтому измерительно-координирующее устройство этих регуляторов может быть однотипно и приспособлено к восприятию и оценке величины давления жидкости или газа.

Измерительно-координирующее устройство регуляторов обычно выполняется в виде поплавка (в основном у регуляторов уровня), колокола и мембраны (у всех регуляторов).

Поскольку измерительное устройство регулятора должно создать импульс силы, достаточной для приведения в действие остальных устройств регулятора, возникает вопрос о величине этой так называемой переставляющей силы, развиваемой тем или другим видом измерительного устройства.

Поплавок. Переставляющая сила поплавка равна разности веса вытесненной поплавком жидкости и веса самого поплавка:

$$P = V\gamma - G \text{ кг}, \tag{281}$$

где V — объем погруженной части поплавка в $дм^3$;

γ — плотность жидкости, в которую погружен поплавок, в $кг/дм^3$;

G — вес поплавка в $кг$.

Чтобы величина переставляющей силы поплавка была одинакова при восходящем и нисходящем движении поплавка, необходимо, чтобы при погружении поплавка на половину своего объема

$$V\gamma = G. \tag{282}$$

Тогда максимальное значение переставляющей силы будет равно весу поплавка.

Чтобы уменьшить колебания уровня, не регулируемого поплавком, т. е. то изменение уровня вверх и вниз от среднего положения, которое необходимо для получения достаточной величины

переставляющей силы, поплавок делается небольшой высоты и значительного диаметра. Наиболее выгодной формой поплавка будет поплавок цилиндрической формы со сферическими днищами (рис. 277).

Поплавки делаются из металлических листов, материал которых подбирается из соображений устойчивости его против химического воздействия жидкости. Стенки поплавка делаются толщиной 0,1—1,0 *мм*. В случае работы поплавка в сосуде с высоким давлением внутренность поплавка соединяется с окружающей средой тонкой трубкой с загнутым концом, накрытой колпачком, как показано на рис. 277.

Для подгонки веса поплавка к необходимой величине, согласно равенству (282), поплавок загружают свинцом или металлическими дисками, уложенными на дно поплавка. Такая загрузка улучшает устойчивость поплавка в жидкости.

Поплавки, как уже сказано, применяются почти исключительно в регуляторах уровня.

Колокол. Перестановочная сила, развиваемая колоколом, равна величине отклонения давления Δp в $кг/м^2$, умноженной на активную поверхность колокола F_2 в $м^2$:

$$P = \Delta p F \; кг. \qquad (283)$$

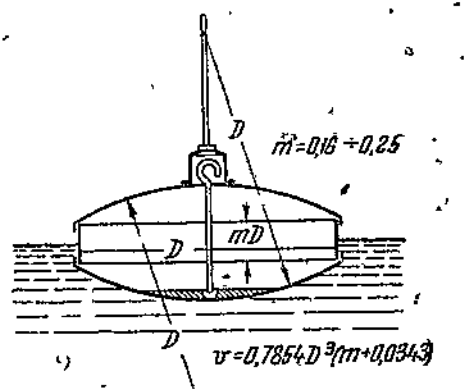


Рис. 277. Поплавок.

Активной поверхностью колокола является площадь сечения поверхности жидкости стенками колокола. Поэтому перестановочная сила на всем пути колокола остается постоянной лишь у цилиндрического колокола, так как площадь сечения поверхности жидкости стенками колокола у цилиндрического колокола не изменяется с подъемом или погружением колокола (рис. 278,*а*).

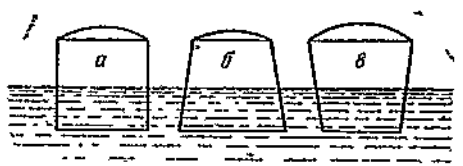


Рис. 278. Типы колоколов.

При коническом колоколе (рис. 278, *б*, *в*) перестановочная сила будет меняться по мере подъема или погружения колокола. Изменение перестановочной силы по направлению будет зависеть от положения конуса.

При положении конуса большим основанием вниз (рис. 278, *б*) перестановочная сила будет возрастать при подъеме колокола и убывать при погружении. Если же конический колокол будет иметь большее основание наверху (рис. 278, *в*), то перестановочная сила будет убывать при подъеме и увеличиваться при погружении.

Для регулировки обычно применяют цилиндрические колокола.

С целью уменьшения количества затворной жидкости ванна колокола выполняется кольцевой, что одновременно уменьшает зеркало испарения затворной жидкости.

В качестве затворной жидкости для давлений от долей миллиметра до 1 *м* вод. ст. применяют воду, раствор хлористого магния, раствор глицерина, вазелиновое масло. Для более высоких давлений (до 3 *кг/см*²) — ртуть.

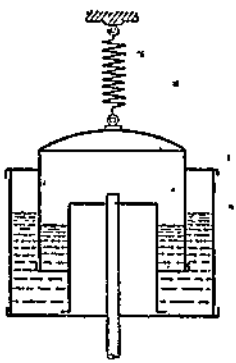


Рис. 279. Колокол с пружиной.

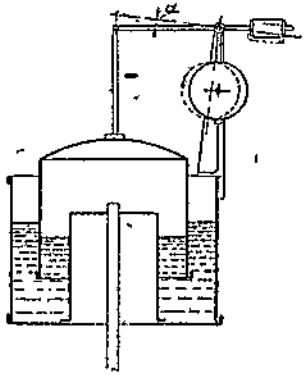


Рис. 280. Колокол с грузовым квадрантом.

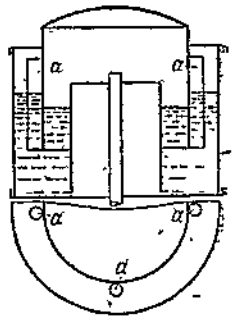


Рис. 281. Колокол с поплавками:
a — поплавки.

Регулирование колоколом может производиться лишь при наличии какой-либо противодействующей силы (пружины или контргруза).

Если противодействующая сила имеет постоянную величину, то цилиндрический колокол будет находиться в равновесии при одной определенной величине давления. Любое отклонение давления от этой величины заставит колокол перейти в одно из крайних положений. Для регулировки необходимо, чтобы каждой величине давления однозначно соответствовало определенное равновесное положение колокола. Это осуществимо при переменной противодействующей силе. Такая переменная противодействующая сила создается либо сжатием пружины (рис. 279), либо грузовым квадрантом (рис. 280), либо, наконец, естественным изменением веса колокола при всплывании или погружении по гидростатическому закону. В последнем случае стенки колокола делают утолщенными или снабжают колокол поплавками *a* (рис. 281).

При уравновешивании колокола пружиной (рис. 279) условие равновесия выразится уравнением:

$$x = \frac{hDf}{hD + 40 f \delta \gamma}, \qquad (284)$$

где x — перемещение колокола в *см*;
h — отклонение давления в *мм* вод. ст.;
D — внутренний диаметр колокола в *см*.

f — чувствительность пружины в *см*, т. е. изменение ее длины под влиянием силы $\Delta p = h\frac{\pi D^2}{4}$;

δ — толщина стенок колокола в *см*;

γ — удельный вес запирающей жидкости в *кг/см*³.

Из уравнения (284) следует, что величина перемещения не зависит от веса подвижных частей прибора, а лишь от чувствительности пружины, изменения давления под колоколом, его диаметра и толщины стенок и плотности запирающей жидкости. Из этого же уравнения следует, что каждой величине давления однозначно соответствует определенное положение колокола.

Пользуясь уравнением (284), можно рассчитать все параметры прибора, задавшись желаемой величиной перемещения x при изменении давления h на известную величину.

Чувствительность прибора может быть доведена до любой степени.

Уравновешивание колокола весовым квадрантом (рис. 280) дает иную зависимость для перемещения колокола при изменении давления.

Уравнение равновесия колокола имеет следующий вид:

$$H = \frac{40\ Qa}{\pi D^2 b}\ \mathrm{tg}\ \alpha + \frac{40\ h\ \delta\gamma}{D}, \qquad (285)$$

где H — давление под колоколом в *мм* вод. ст.;

Q — вес груза квадранта в *г*;

a — расстояние центра тяжести квадранта от точки опоры в *см*;

D — внутренний диаметр колокола в *см*;

b — длина рычага, на котором подвешен колокол, в *см*;

$\mathrm{tg}\alpha$ — тангенс угла отклонения квадранта;

h — глубина погружения стенок колокола в жидкость в *см*;

δ — толщина стенок колокола в *см*;

γ — плотность запирающей жидкости в *г/см*³.

Для данного колокола множители $\frac{40\ Qa}{\pi D^2 b}$ и $\frac{40\delta\gamma}{D}$ — величины постоянные.

Если обозначить:

$$\frac{40\ Qa}{\pi D^2 b} = M \text{ и } \frac{40\ \delta\gamma}{D} = N,$$

то уравнение (285) примет вид:

$$H = M\ \mathrm{tg}\ \alpha + Nh. \qquad (286)$$

Изменение давления вызовет перемещение колокола, причем изменится угол отклонения квадранта и глубина погружения стенок.

Изменение давления на величину ΔH изменит условия равновесия и положение колокола. Это изменение выразится следующим равенством:

$$\Delta H = M\ (\mathrm{tg}\ \alpha_1 - \mathrm{tg}\ \alpha) + N.\ \Delta\ h, \qquad (287)$$

где $\mathrm{tg}\alpha_1$ — тангенс угла в новом положении равновесия;

Δh — изменение глубины погружения стенок колокола.

Как видно из уравнений (285 и 287), перемещение колокола не зависит от его веса, а лишь от его геометрических размеров и веса контргруза квадранта.

Условия гидростатического уравновешивания колокола рассмотрены в гл. II (стр. 31).

Мембраны. Плоские мембраны из гибкого неэластичного материала (кожа, прорезиненная ткань) применяются для невысоких давлений — до 1000 *мм* вод. ст. Для больших давлений применяются металлические плоские или гармониковые мембраны.

Перестановочная сила плоской мембраны из гибкого материала резко изменяется в зависимости от положения мембраны по длине ее хода.

В начальном положении, когда мембрана у заделанного края расположена в горизонтальной плоскости, а средняя точка ее в нижнем положении (рис. 282, *а*), перестановочная сила равна давлению, умноженному на площадь мембраны:

$$P = Fp. \tag{288}$$

Активная поверхность мембраны равна полной ее площади.

В средине хода, когда средняя точка мембраны находится в плоскости кольца заделки (рис. 282), активная поверхность мембраны равна одной трети полной ее площади и перестановочная сила составляет одну треть начальной:

$$P = \frac{F}{3} p. \tag{289}$$

В конце хода, когда средняя часть мембраны представляет горизонтальную плоскость (рис. 282, *в*), перестановочная сила становится равной нулю, так как напряжения в средней части мембраны лежат в горизонтальной плоскости и их равнодействующая относительно центральной точки мембраны равна нулю.

Таким образом, перестановочная сила плоской гибкой мембраны изменяется в пределах от нуля до единицы, составляя в средине хода одну треть. Для процесса регулирования важно, чтобы перестановочная сила не изменялась слишком сильно в пределах рабочего хода измерительного органа. Принимая допустимые изменения перестановочной силы мембраны ± 20% от ее среднего значения, получим значение рабочего хода мембраны около 14% всего возможного хода.

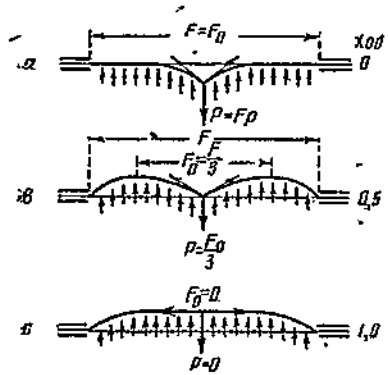


Рис. 282. Гибкая мембрана.

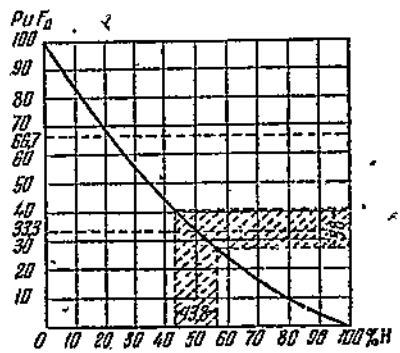


Рис. 283. Перестановочная сила гибкой мембраны.

На рис. 283 используемая область гибкой мембраны заштрихована пунктиром.

Для увеличения располагаемой перестановочной силы и рабочего хода мембраны применяют так называемую кольцевую мембрану. Кольцевая мембрана получается из обычной гибкой мембраны путем уничтожения гибкости средней части мембраны. Это осуществляется зажиманием центрального участка мембраны между двумя жесткими дисками (рис. 284).

Диски изготовляются диаметром не более 0,8 диаметра мембраны. Активная поверхность кольцевой мембраны в положении половины хода составляет около $^2/_3$ общей ее поверхности, т. е. вдвое больше, нежели у гибкой мембраны. Таким образом, кольцевая мембрана позволяет располагать вдвое большей перестановочной силой и почти вдвое большим рабочим ходом при той же величине неравномерности перестановочной силы ($\pm 20\%$) (рис. 285).

Однако силы сопротивления при изменении формы мембраны во время ее движения у кольцевой мембраны значительно выше, что понижает ее чувствительность и делает регулирование менее точным. Поэтому измерительные мембраны обычно делаются гибкими.

Так же как и в случае колокола, измерение давления мембраной возможно лишь при наличии противодействующей силы, создаваемой грузом или пружиной. Поскольку перестановочная сила мембраны переменна, уравновешивание грузом для мембран более благоприятно, так как изменение с прогибом пружины противодействующей силы увеличивает неравномерность.

Преимущество пружин заключается в том, что благодаря их меньшей массе уменьшаются инерционные силы системы.

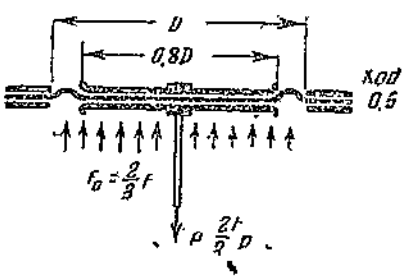


Рис. 284. Кольцевая мембрана.

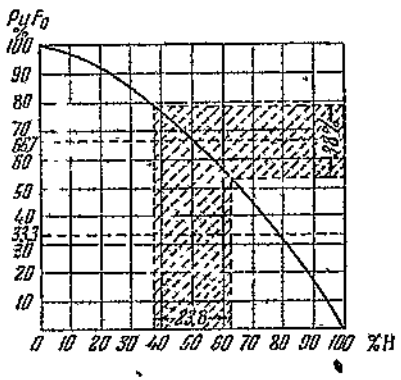


Рис. 285. Перестановочная сила кольцевой мембраны.

В точных регуляторах для устранения изменения силы пружины с изменением ее прогиба применяют передачу с изменяющимся плечом (рис. 286).

Тяга пружины *1*, выполненная в виде гибкой стальной ленты *2*, закреплена на улиткообразном кулаке *3*, с которым скреплены два цилиндрических ролика *4*. К роликам прикреплены стальные ленты *5*, вторые концы которых прикреплены к пальцам *6* на

шпинделе мембраны. При прогибе мембраны вниз шпиндель мембраны поворачивает ролики *4* и кулак *3*, растягивая пружину. Сила пружины при растяжении увеличивается, но одновременно благодаря повороту кулака *3* плечо действия силы уменьшается. Соответственным подбором кривой поверхности кулака *3* можно достичь любой степени равномерности.

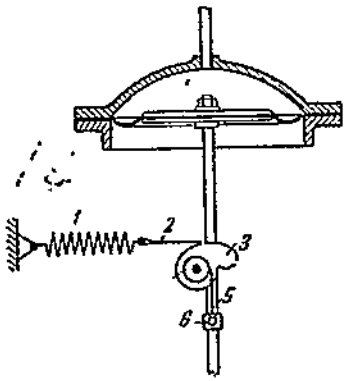


Рис. 286. Уравновешивание пружиной с переменным плечом силы:
1 — пружина; *2* — стальная лента; *3* — улиткообразный кулак; *4* — ролики; *5* — стальные ленты; *6* — пальцы для крепления лент.

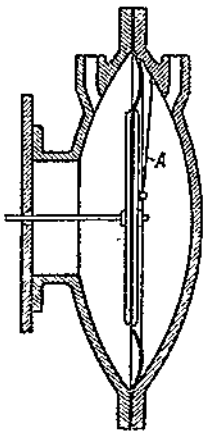


Рис. 287 Подвеска гибкой мембраны:
А — подвеска.

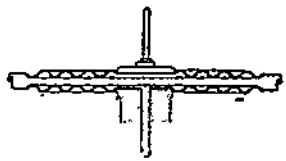


Рис. 288. Мембранная коробка.

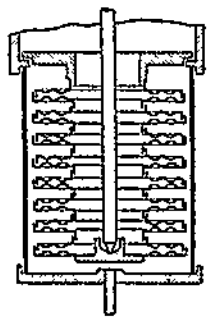


Рис. 289. Сложная мембрана.

Измерительные мембраны предпочтительно располагаются в вертикальной плоскости, чтобы избежать неточностей из-за скопления на мембране жидкости (конденсата). Но при вертикальном расположении мембраны верхний край ее натягивается собственным весом, особенно при наличии жестких дисков, и средняя часть мембраны под действием измеряемого давления стремится занять наклонное положение. Для устранения этого явления применяют особую подвеску *А*, воспринимающую собственный вес мембраны (рис. 287).

Для давлений выше 1000 *мм* вод. ст. применяются металлические мембраны плоские и волнистые. Плоские металлические мембраны менее чувствительны и имеют значительно меньшие прогибы, почему применяются только в регуляторах непрямого действия, где величина перемещения мембраны может быть сведена к минимуму.

Характеристика металлической мембраны зависит от ее толщины, модуля упругости материала и формы и размеров выштампованных волн.

Металлические мембраны изготовляются из латуни, томпака, нейзильбера, бронзы, монель-металла, стали ЭЯ-1 и других сплавов.

С целью повышения величины прогиба и чувствительности металлических мембран применяют сложные мембраны, состоящие из двух или нескольких мембран, соединенных в общий блок (рис. 288, 289).

В последнее время сложные металлические мембраны с успехом заменяют бесшовными волнистыми трубками — **сильфонами**, позволяющими работать при очень высоких давлениях (до 120 *кг/см*²) (рис. 290).

Кроме мембран в измерительно-координирующих системах используются трубки Бурдона. Трубки Бурдона применяются для давлений выше 1 *кг/см*², причем в измерительно-координирующих устройствах регуляторов используется не перемещение свободного конца трубки, как это имеет место в манометрах, а сила, возникающая в трубке при ее разгибании под действием давления.

Эта сила также в известных пределах пропорциональна измеряемому давлению и поэтому может быть применена для целей регулировки.

Сила, развиваемая трубкой Бурдона, обычно меньше силы металлической мембраны и поэтому трубка Бурдона применяется лишь в регуляторах непрямого действия с очень чувствительными реле, требующими минимальной величины импульса для своего действия.

Для измерения разности давлений применяются мембраны всех описанных выше типов.

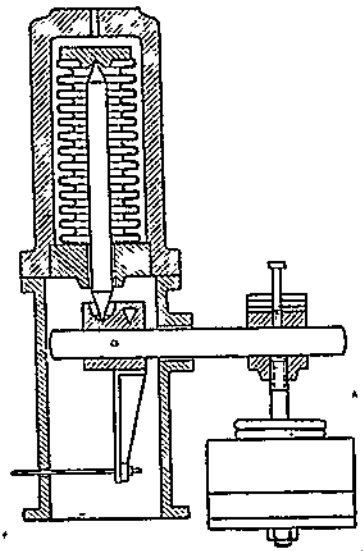


Рис. 290. Сильфонная мембрана.

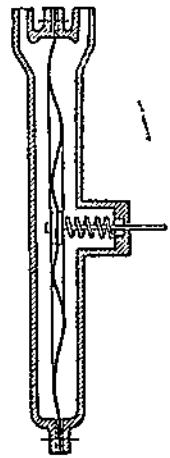


Рис. 291. Гибкая мембрана для низких давлений.

Для регулирования количеств и давлений при **низких** рабочих **давлениях** применяются **гибкие мембраны** из кожи или прорезиненной ткани. На рис. 291 схематически представлено устройство такой мембраны.

При более высоких давлениях возникают затруднения с уплотнением стержня мембраны, так как трение в уплотняющей детали (сальник, лабиринт) понижает чувствительность устройства, а непостоянство величины трения в уплотнении вносит неопределенную погрешность в измерение. Поэтому уже при относительно невысоких давлениях применяют **сложные мембраны** или **сильфоны**.

На рис. 292 изображено **устройство** для **измерения** разности давлений системы Аскания. Устройство состоит из двух волнистых мембран *1* и *2*, заключенных в герметические цилиндры *3* и *4*. Обе мембраны соединены общим стержнем *5*, на который действует через рычаг *6* груз *7*, создающий противодействующую силу. Полости цилиндров *3* и *4* соединены с измеряе-

мыми давлениями. Перестановка стержня *5* будет зависеть таким образом от разности давлений в обоих цилиндрах.

Величина измеряемой разности давлений устанавливается передвижением подвески груза *7* по рычагу *6*.

Ртутные весы. Измерение малой разности давлений при высоком рабочем давлении, что часто имеет место при измерении расхода пара или газа, представляет значительные трудности. Применение металлических мембран мало целесообразно вследствие недостаточной их чувствительности. Поэтому в этих случаях применяются так называемые ртутные весы с гибкими подводящими трубками, представляющие видоизменение известных кольцевых весов.

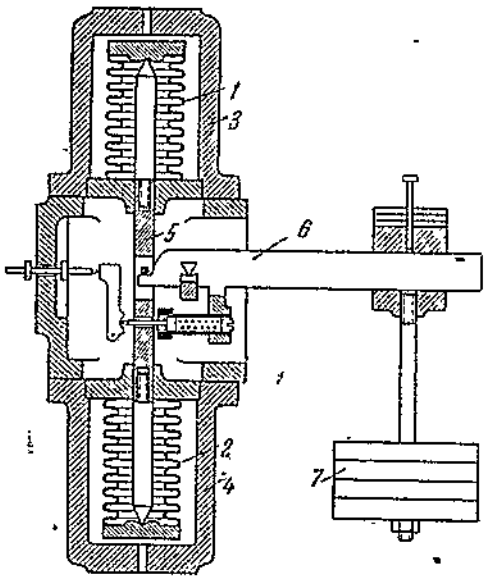


Рис. 292. Диференциальное измерительное устройство с сильфонными мембранами: *1* и *2* — сильфоны; *3* и *4* — цилиндры; *5* — шток мембран; *6* — рычаг; *7* — груз.

Ртутные весы (рис. 293) представляют собой два сосуда *1* и *2*, соединенные трубкой *3*. Сосуды заполнены до некоторого уровня ртутью и при помощи перемычки *4* подвешены на призме. Внутренние полости сосудов сообщаются с измеряемыми давлениями гибкими металлическими трубками *5* и *6*. Перетекание части ртути под действием разности давлений из одного сосуда в другой выводит систему из равновесия. Поворот весов пропорционален разности давлений, так как новое положение равновесия определяется равенством избытка веса ртути в одном из сосудов и силы упругости подводящих трубок.

Другая разновидность ртутных весов изображена на рис. 294. Этот тип отличается от предыдущего тем, что в нем сосуд большего давления неподвижен, а сосуд меньшего давления подвешен на эластичных пружинах и перемещается под действием веса перетекающей в него ртути.

При регулировании количества перемещение весов должно быть пропорционально корню квадратному из разности давлений. Это легко осуществляется параболической формой плюсового сосуда весов (рис. 294).

Кроме этих специфических конструкций, в очень многих регуляторах в качестве измерительно-координирующих устройств применяются обычные типы контрольно-измерительных приборов, могущих создавать электрические импульсы.

Такие приборы, как автоматические потенциометры, контактные гальванометры, логометры, широко используются в регуляторах в роли измерительно-координирующих устройств. В последнее время с развитием фотореле большое значение приобретают зеркальные гальванометры.

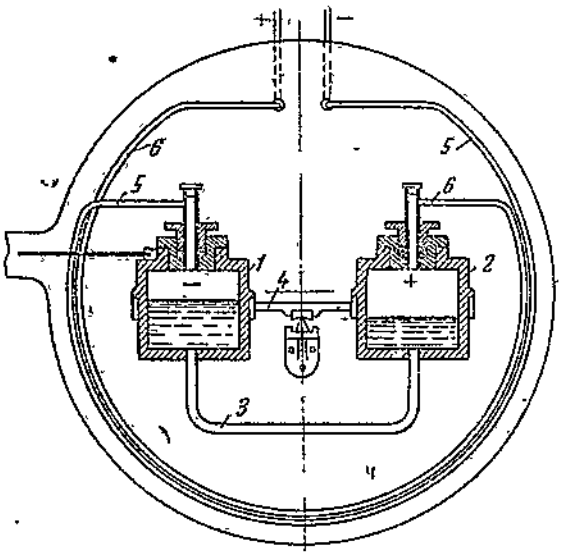


Рис. 293. Ртутные весы:
1 и *2* — сообщающиеся сосуды; *3* — соединительная трубка; *4* — перемычка; *5* и *6* — гибкие трубки для подвода давления.

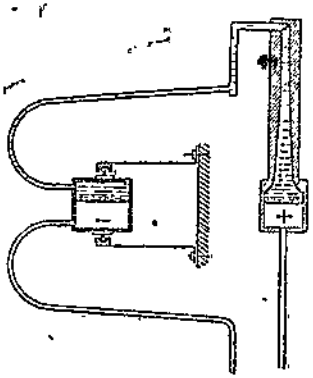


Рис. 294. Ртутные весы с параболическим сосудом.

65. Гидравлические реле

Одним из основных узлов регулирующих устройств непрямого действия является механизм, называемый реле. Реле служит промежуточным звеном между измерительно-координирующим устройством и исполнительным механизмом регулятора. Реле представляют собой универсальные механизмы, т. е. одно и то же реле может быть использовано в самых различных регуляторах и выполнять различные функции.

Основными назначениями реле являются усиление мощности полученного импульса, осуществление процесса включения исполнительного механизма и отъединение управляющей системы от управляемой. По используемому виду энергии реле делятся на гидравлические, электрические и смешанные (электрогидравлические и электропневматические).

Гидравлические реле используют энергию сжатого воздуха или находящейся под давлением жидкости (вода, глицерин, масло). Управление рабочим веществом, являющимся носителем энергии, осуществляется золотниками, вспомогательными дросселями или отклонением струи.

Золотники. Наиболее старыми типами гидравлических реле являются краны и уравновешенные золотники, приводимые в действие непосредственно измерительной частью регулятора.

Эти виды реле в настоящее время имеют очень ограниченное применение, так как неизбежное трение в местах уплотнения сильно влияет на чувствительность и точность регулирования.

Некоторым распространением пользуются уравновешенные цилиндрические золотники. На рис. 295 представлено устройство уравновешенного золотника для двустороннего управления. Двойной поршневой золотник *1* передвигается в пришлифованной к нему втулке *2*, запресованной в цилиндр *3*. Втулка снабжена тремя рядами радиальных отверстий *4*, сообщающими ее полость с каналами *5*, *6* и *7*. Канал *6* соединен с трубкой, подающей жидкость или воздух под давлением от насоса или компрессора. Каналы *5* и *7* соединены трубками с передней и задней полостью поршневого цилиндра или мембраны исполнительного механизма. Передвижение золотника вправо или влево от среднего положения соединяет каналы *5* или *7* с каналом *6*. Жидкость или сжатый воздух начинает поступать в соответствующую полость цилиндра исполнительного механизма, передвигая поршень, связанный с регулирующим органом. Жидкость из другой полости вытесняется через соответствующий канал золотника в отводную трубку *8*. Для соединения канала *5* с отводной трубкой *8* золотник имеет осевое сверление *9*.

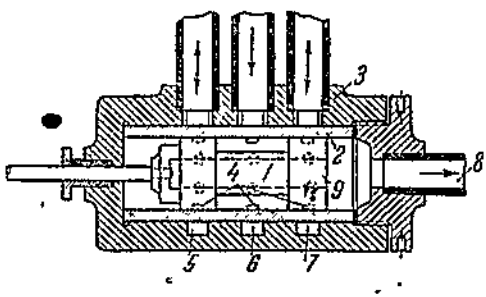


Рис. 295. Золотниковое реле:

1 — двойной цилиндрический золотник; *2* — втулка; *3* — цилиндр; *4* — радиальные отверстия; *5*, *6* и *7* — каналы; *8* — отводная трубка; *9* — осевой канал золотника.

Для уменьшения трения в сальнике и повышения этим чувствительности регулятора в некоторых системах применяется непрерывное вращение золотников реле. Однако в золотниковых реле при протекании жидкости через золотник возникают, кроме трения, еще силы реакции, которые полностью не уравновешиваются и оказывают обратное действие на измерительную часть регулятора. Чтобы устранить и этот недостаток, Рейнеке предложил конструкцию, осуществляющую перестановку золотника реле при помощи падающей дужки.

Устройство золотникового реле Рейнеке схематически изображено на рис. 296.

В цилиндре *1* движется пришлифованный к нему четырехпоршневой золотник *2*.

Золотник с обоих концов нагружен одинаковыми пружинами *3*, действующими на него при помощи толкателей *4*. Пружины *3* вследствие равенства их сил удерживают золотник в среднем положении, в котором каналы

5 и *6*, соединяющие реле с исполнительным механизмом, перекрыты поршнями золотника. В толкатели упираются короткие плечи коленчатых рычагов *7* и *8*, вращающихся на осях *9* и *10*. Длинные концы рычагов *7* и *8* расположены по одной линии параллельно оси цилиндра. Перестановка золотника производится стрелкой *11* измерительного устройства, нажимающей тот или другой рычаг под действием падающей дужки *12*, приводимой в периодическое движение каким-либо механизмом (часовым механизмом, мотором Уоррена и т. п.).

В этой системе измерительное устройство полностью освобождено от обратного воздействия реле. В качестве измерительного устройства к реле Рейнеке может быть использован любой контрольно-измерительный прибор стрелочного типа.

Недостатком реле Рейнеке является относительная сложность и громоздкость системы.

Дроссельное реле Арка. В настоящее время наиболее распространены гидравлические реле дроссельного и струйного типа, или так называемые реле Арка и Аскания.

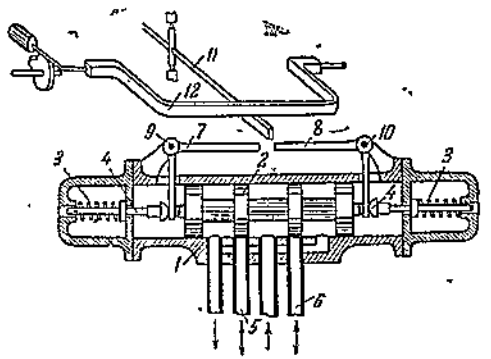


Рис. 296. Золотниковое реле Рейнеке:

1 — цилиндр; *2* — четырехпоршневой золотник; *3* — пружины; *4* — толкатели; *5* и *6* — каналы для соединения с исполнительным механизмом; *7* и *8* — коленчатые рычаги; *9* и *10* — оси вращения рычагов; *11* — стрелка измерительного устройства; *12* — падающая дужка.

Действие дроссельных реле, или реле Арка, основано на изменении давления в соединительном трубопроводе двух дроссельных устройств в зависимости от изменения соотношения проходных сечений обоих дросселей.

Если в некотором трубопроводе *1* (рис. 297), по которому течет поток жидкости или газа под давлением, установить два дросселя *2* и *3*, то величина давления в участке трубопровода *4* между двумя дросселями определится из следующих соображений.

Пусть сечение дросселя *2* будет F_1, а сечение дросселя *3* F_2. Давление перед дросселем *2* будет p_1, а давление в промежутке между дросселями будет p_2.

Тогда из условия равенства расхода через оба дросселя можно написать:

$$F_1\sqrt{\frac{2g}{\gamma}(p_1-p_2)}=F_2\sqrt{\frac{2g}{\gamma}p_2}, \qquad (290)$$

отсюда следует:

$$\frac{p_2}{p_1}=\frac{1}{1+\left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2} \qquad (291)$$

или

$$p_2 = p_1 \frac{1}{1+\left(\frac{F_2}{F_1}\right)^2}. \qquad (292)$$

Из уравнения (292) следует, что давление между дросселями зависит от начального давления p_1 и отношения сечений обоих дросселей $\frac{F_2}{F_1}$.

Изменять величину давления p_2 при постоянном начальном давлении p_1 можно, изменяя сечение одного или другого дросселя или обоих одновременно.

В зависимости от выбранного метода изменений соотношения сечений дросселей будет изменяться характер кривой отношения давлений $\frac{p_2}{p_1}$.

На рис. 298 представлены кривые изменений отношения давлений $\frac{p_2}{p_1}$ в зависимости от способа изменения отношения $\frac{F_2}{F_1}$.

Кривая $\frac{p_2}{p_1}$, полученная при изменениях сечения входного дросселя, и кривая $\frac{p_2}{p_1}$, полученная при изменении сечения выходного дросселя, аналогичны и отличаются лишь по направлению изменения давлений (рис. 298, *а* и *б*).

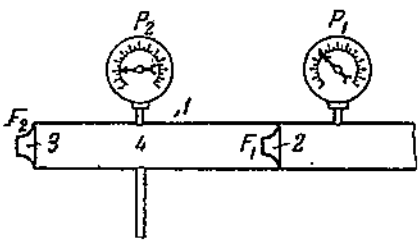


Рис. 297. Принципиальная схема реле Арка:

1 — трубопровод; *2* и *3* — дроссели; *4* — участок изменяемого давления; P_1 и P_2 — манометры.

Обе кривые в конце идут чрезвычайно полого, что позволяет использовать для регулировки около 70% всего перепада давления.

Реле Арка может дать давление только на одну сторону поршня или мембраны исполнительного механизма. Обратный ход исполнительного механизма осуществляется пружиной или грузом.

Перестановочная сила исполнительного механизма должна быть по возможности одинакова в обоих направлениях движения, чтобы скорость регулирования в обе стороны была одинакова. Поэтому сила груза или пружины должна равняться половине силы, создаваемой давлением.

Таким образом, реле Арка при изменении сечения одного дросселя может использовать в исполнительном механизме 35% первоначального давления.

В случае одновременного изменения сечения обоих дросселей условия становятся несколько благоприятнее и для регулирования в исполнительном механизме можно использовать 50% первоначального давления (рис. 298, *в*). Однако увеличение переставляющей силы с 35 до 50% не оправдывает конструктивного усложнения реле, поэтому практически во всех регуляторах с реле Арка изменяется сечение одного выходного дросселя. Конструктивно — выходной дроссель выполняется в виде сопла, перекрываемого так называемой отражательной пластинкой, приближаемой или удаляемой от отверстия сопла измерительной частью регулятора.

На пластинку действует реактивная сила струи, выходящей из сопла, равная:

$$R = 2Fp, \qquad (293)$$

где R — реактивная сила струи в *кг*;
F — сечение сопла в *см*^{2};
p — давление у выхода из сопла в *кг/см*^{2}.

Эта реактивная сила передается на измерительное устройство, действуя тормозящим образом и уменьшая таким образом чувствительность измерителя. Однако в некоторых случаях затормаживающее действие реактивной силы струи оказывается полезным, делая регулирование более плавным.

Струйное реле Аскания. Другой столь же распространенный тип гидравлических реле — струйное реле Аскания, действующее на основе преобразования в сопле энергии давления рабочей жидкости в кинетическую энергию и обратного превращения кинетической энергии струи в приемном сопле в давление, используемое для действия исполнительного механизма.

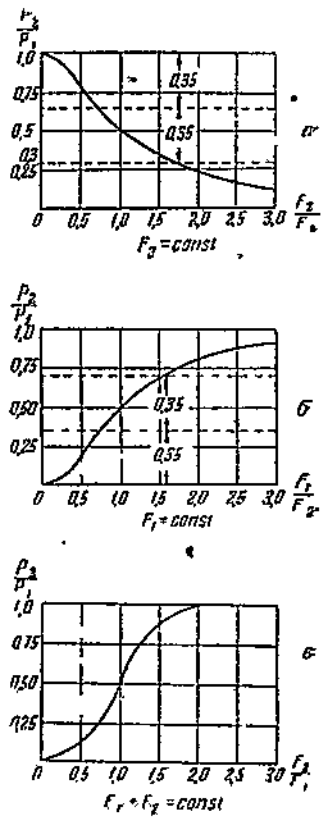


Рис. 298. Кривая давления при различных значениях $\frac{F_2}{F_1}$.

Отклонением струи от оси приемного сопла можно изменять давление в нем от нуля до максимального значения. Устройством двух приемных сопел осуществляется двухстороннее действие исполнительного механизма с использованием полного давления рабочей жидкости в прямом и обратном ходе исполнительного механизма.

На рис. 299 изображено принципиальное устройство реле Аскания. Трубка *1* укреплена шарнирно в точке *О*. К точке *А*

трубки укрепляется поводок измерительного устройства, осуществляющего отклонение трубки вверх и вниз в плоскости чертежа на очень небольшой угол. Открытый конец трубки сужен в виде сопла *2*. Сопло расположено против металлического блока *3*, внутри которого высверлены под углом один к другому два приемных сопла *4* и *5*, соединенных трубками с цилиндром исполнительного механизма *6*.

При среднем положении подающего сопла трубки по отношению к приемным соплам давления в обоих соплах одинаковы

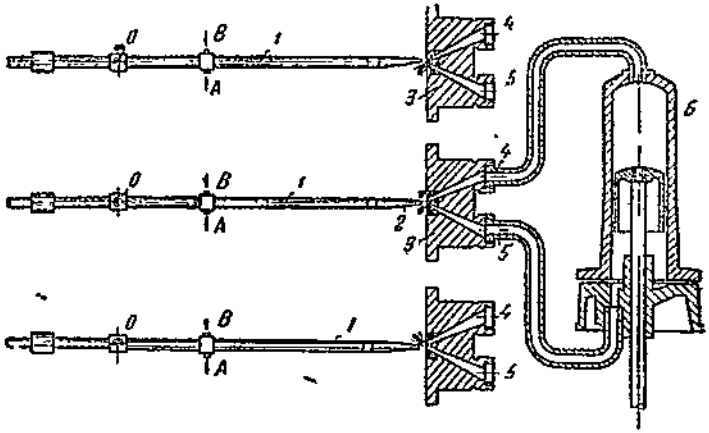


Рис. 299. Схема струйного реле Аскания:

1 — струйная трубка; *2* — сопло; *3* — блок приемных сопел; *4* и *5* — приемные сопла; *6* — цилиндр исполнительного механизма; *O* — шарнир струйной трубки; *A* и *B* — точки укрепления поводка.

и поршень исполнительного механизма находится в покое. При малейшем отклонении подающего сопла в сторону одного из приемных сопел давление в нем резко возрастает и поршень исполнительного механизма начинает передвигаться в соответствующую сторону.

Преобразование энергии давления в кинетическую и обратно теоретически происходит без потерь, практически часть энергии затрачивается на трение, завихрения жидкости и т. п. и в исполнительном механизме используется 90—95% энергии давления рабочей жидкости.

На рис. 300 представлена экспериментально полученная картина изменения давлений в приемных соплах при перемещении струйной трубки.

В реле Аскания реактивная сила струи, вытекающей из струйной трубки, при правильном исполнении всегда проходит через ось шарнира трубки.

Таким образом, струйная трубка не оказывает никакого воздействия на измерительную систему; вследствие этого для перемещения струйной трубки требуется весьма малое усилие со стороны измерителя.

Другим преимуществом струйного реле является его малая чувствительность к засорениям, так как проходы сопел могут быть сделаны достаточно большими и мелкие посторонние частицы, находящиеся в жидкости, будут свободно проходить через систему, не создавая опасности забивания каналов.

Дроссельные реле Арка в этом отношении значительно чувствительнее.

Реле Аскания работает только с жидкостью, в то время как в реле Арка может быть использована и жидкость и сжатый воздух.

На рис. 301 представлено струйное устройство в выполнении завода КИП Главкокса. Струйное регулирующее устройство объединяет струйное реле и измерительную мембрану.

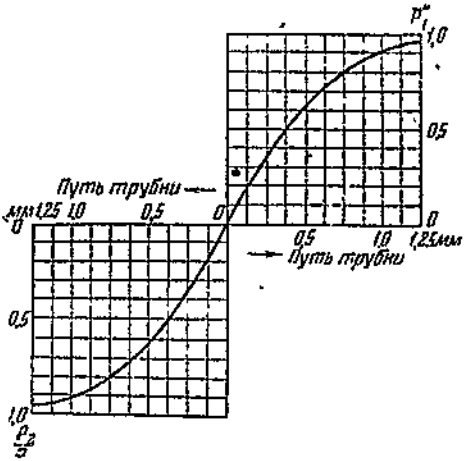


Рис. 300. Изменение давления в приемных соплах.

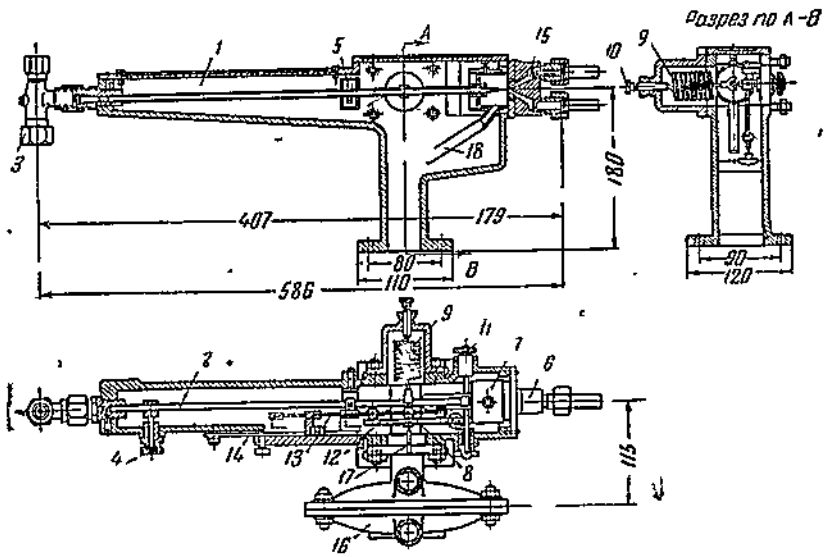


Рис. 301. Струйное регулирующее устройство завода КИП Главкокса:

1 — чугунный корпус; *2* — струйная трубка; *3* — питающая насадка; *4* — упорный винт; *5* — скользящая опора; *6* — блок приемных сопел; *7* — цилиндрический экран; *8* — регулирующий ролик; *9* — пружина; *10* — регулировочный винт; *11* — установочный винт; *12* — промежуточный рычаг; *13* — ползушка; *14* — рукоятка ползушки; *15* — отверстия приемных сопел; *16* — измерительная мембрана; *17* — шток мембраны; *18* — труба для стока масла.

В чугунном корпусе *1* помещена струйная трубка *2*, закрепленная одним концом в питающей насадке *3*. Другой конец трубки оттянут в виде сопла и может перемещаться перед отверстиями приемных сопел *15*, высверленных в стальном блоке *6*. Перемещение свободного конца струйной трубки происходит вследствие ее гибкости под действием измерительной мембраны *16*. Передача импульса от мембраны *16* выполняется штоком *17* через промежуточный рычаг *12* и ролик *8*. Противодействующая сила создается пружиной *9*.

Ролик *8* укреплен на ползушке *13*, передвигаемой рукояткой *14*. Перемещение ролика *8* в пределах между крайними положениями, указанными на рисунке пунктиром, изменяет соотношение плеч рычажной передачи, позволяя устанавливать различную чувствительность регулятора. Натяжение пружины *9* изменяется регулировочным винтом *10*. Во избежание прогиба трубки от собственного веса она имеет скользящую опору *5*. Для устранения разбрызгивания масла сопло трубки защищено цилиндрическим экраном *7* с трубкой для стока масла *18*. Упорный винт *4* служит для точной установки трубки против отверстий приемных сопел.

Реле Аскания выполняется в виде агрегата, объединяющего бак для рабочей жидкости (обычно масло), шестеренный насос с мотором и реле с измерительной мембраной.

На рис. 302 представлен общий вид струйного устройства Аскания.

Вторичные реле или усилители. В тех случаях, когда от исполнительного механизма требуется получить очень большую мощность (перестановка клапанов вентилей высокого давления, тяжелых дымовых заслонок и т. п.), количество рабочей жидкости, подаваемое реле, оказывается недостаточным для того, чтобы получить необходимую скорость перестановки регулирующего органа. Для увеличения мощности устройства в таких случаях включают в систему вторичные реле или усилители.

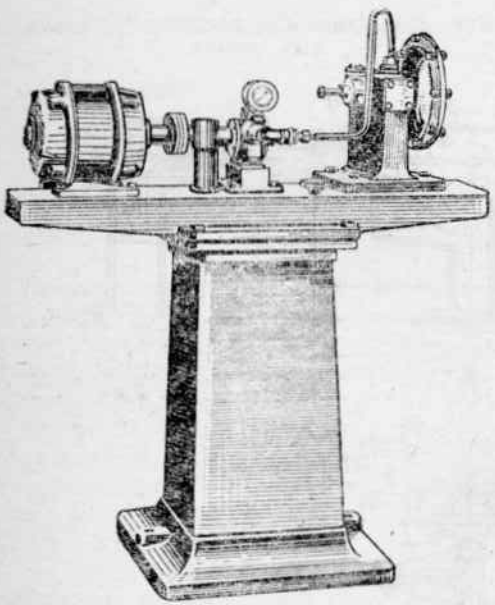


Рис. 302. Струйный регулятор типа Аскания.

На рис. 303 изображено устройство вторичного дроссельного реле системы Арка.

Прибор представляет соединение первичного реле Арка и усилителя в одном агрегате. Рабочая жидкость поступает в прибор по трубе *1* и проходит через первый нерегулируемый дроссель *a*, образованный осевым каналом в теле золотника *2* и вставленным в канал стержнем *3*. После первого дросселя жидкость проходит в полость *b* между крышкой прибора и мембраной *4* и далее по каналу *5* к регулируемому соплу *c*, сечение которого регулируется отражательной пластинкой *6*, укрепленной на коленчатом рычаге *7*. Рычаг *7* имеет ножевую опору *8* и нагружен пружиной *9*, стремящейся прижать отражательную пластинку к отверстию сопла. На второй конец рычага в точке *d* действует поводок измерительного устройства, отклоняющего рычаг *7* в зависимости от изменения показателя регулирования. Изменяющееся в результате двойного дросселирования давление в полости *b*, действуя на мембрану *4*, перемещает золотник *2* вправо или влево. Перемещение золот-

ника влево соединяет трубу *1* с трубой *11*, идущей к исполнительному механизму, и рабочая жидкость поступает в цилиндр исполнительного механизма, приводя его в действие. При перемещении золотника вправо цилиндр исполнительного механизма через трубу *11* соединяется с отводной трубой *12*, давление в цилиндре сбрасывается и исполнительный механизм совершает обратный ход. Мембрана *4* нагружена пружиной *10*, обеспечивающей перемещение золотника вправо при падении давления в полости *b*.

Сечение труб *1* и *11* во много раз больше сечения дросселя *a*, благодаря чему к исполнительному механизму подается значительно большее количество рабочей жидкости, чем могло бы поступить непосредственно от реле при более высоком давлении; в результате мощность регулирующего устройства весьма сильно увеличивается.

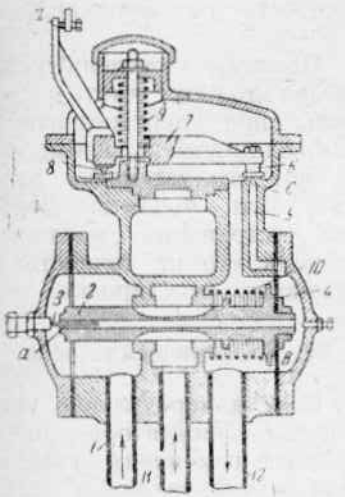


Рис. 303. Вторичное реле (усилитель) Арка:

1 — подающая труба; *2* — золотник; *3* — дросселирующий стержень; *4* — мембрана; *5* — канал; *6* — отражательная пластинка; *7* — коленчатый рычаг; *8* — ножевая опора; *9* — пружина; *10* — пружина мембраны; *11* — труба к исполнительному механизму; *12* — труба, отводящая жидкость; *a* — первый постоянный дроссель; *b* — промежуточная полость; *c* — регулируемое сопло; *d* — точка крепления поводка от измерительного устройства.

На рис. 304 изображена схема усилителя для струйного реле системы Аскания. В этом усилителе также объединены и первичное и вторичное реле. Усилитель Аскания состоит из цилиндра *1*, в котором движется поршневой золотник *2*. Золотник соединен с управляющим поршнем *3*, движущимся в цилиндре большего диаметра.

Управляющий поршень *3* снабжен перекрещивающимися сверлениями с соплами, куда попадает струя жидкости из струйной трубки *4*. Таким образом, поршень играет роль первичного реле. При отклонении струйной трубки вправо струя жидкости попадает в правое сопло. Давление с левой стороны поршня увеличивается и поршень вместе с золотником начнет перемещаться вправо до тех пор, пока закраина между обоими приемными соплами не станет точно против отверстия струйной трубки. В этот момент давление с обеих сторон управляющего поршня выровняется и поршень остановится в новом положении. Таким образом, поршень с золотником всегда точно следует за движением струйной трубки.

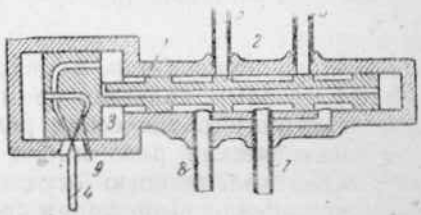


Рис. 304. Вторичное реле (усилитель) Аскания:

1 — цилиндр; *2* — поршневой золотник; *3* — управляющий поршень; *4* — струйная трубка; *5* и *6*—трубки к исполнительному механизму; *7* — подающая труба; *8*—сливная труба; *9* — каналы управляющего поршня.

Перемещение золотника выполняет соединение одной из двух труб *5* или *6*, идущих к исполнительному механизму, с подающей рабочую жидкость трубой *7*. В то время как одна из труб, допустим *5*, соединяется с трубой *7*, другая труба, *6*, соединяется с отводной трубой *8*, давая выход жидкости из холостой полости цилиндра исполнительного механизма.

На рис. 305 приведена конструкция этого усилителя. Обозначения деталей те же, что на рис. 304.

При помощи усилителей можно получить любую мощность исполнительного механизма. Однако следует учитывать, что установка усилителя усложняет систему регулятора, уменьшая его эксплоатационную надежность. Кроме того, включение усилителя вызывает некоторое запаздывание действия исполнительного механизма по отношению к регулировочному импульсу, что в некоторых случаях может уменьшить устойчивость регулирования, а иногда вызвать раскачивание системы.

Поэтому включение усилителя должно иметь место лишь при действительной необходимости и, кроме того, при его установке должны быть приняты меры для устранения вредного влияния его на точность и плавность регулировки.

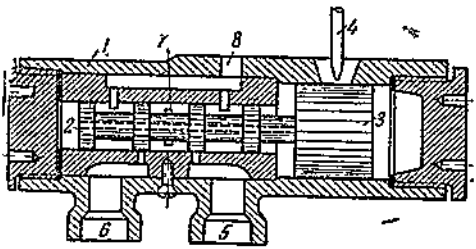


Рис. 305. Конструкция вторичного реле Аскания завода КИП Главкокса:

1 — цилиндр; *2* — поршневой золотник; *3* — управляющий поршень; *4* — струйная трубка; *5* и *6* — трубки к исполнительному механизму; *7* — подающая труба; *8* — сливная труба.

66. Электрические реле

Если измерительное устройство регулятора превращает изменения показателя регулирования в электрические импульсы или исполнительный механизм регулятора приводится в действие электрической энергией, наиболее удобным является применение электрических или смешанных электрогидравлических реле.

Электрические реле имеют своим преимуществом крайнюю гибкость, позволяющую осуществлять неисчерпаемое множество комбинаций для выполнения самых сложных задач регулирования и управления процессом. Немаловажным достоинством является также простота устройства дальнодействующих передач при неограниченном пределе удаления одной части регулирующего устройства от другой и отсутствии всякого запаздывания в передаче регулирующих импульсов.

Основным назначением электрических, так же как всех реле, является управление значительными мощностями от слабых импульсов, создание и прекращение связи отдельных частей регулятора, включение и выключение сигнальных устройств и исполнительного механизма системы.

Электрические реле выполняются в чрезвычайно большом количестве типов, которые по принципу действия можно разделить на следующие.

Электромагнитные реле, основанные на намагничивании железного сердечника при обтекании его электрическим током.

Магнитоэлектрические, действие которых основано на взаимодействии электрического тока с магнитным полем.

Электродинамические, основанные на взаимодействии электрических токов.

Индукционные реле, использующие явления индукции.

Электронные реле, действие которых основано на явлении испускания накаленным катодом электронного потока.

Фотоэлектрические реле, использующие появление электронного потока при освещении некоторых металлов или изменения электропроводности некоторых полупроводников при их освещении.

Тепловые реле, действие которых вызывается выделением тепла в проводнике при прохождении через него электрического тока.

По скорости реакции на командный импульс электрические реле делятся на:

Реле мгновенного действия, срабатывание которых происходит в период времени, меньший 0,01 сек.

Быстро действующие, рабочий период которых составляет менее 0,3 сек.

Нормально действующие с продолжительностью срабатывания 0,3—0,5 сек.

Медленно действующие, рабочий период которых продолжается около 1 сек.

Реле с выдержкой времени, продолжительность рабочего периода которых может быть установлена от нескольких секунд до часов.

Наибольшим распространением в современных регулирующих системах пользуются реле электромагнитные, электронные и фотоэлектрические.

Электромагнитные реле. Принципиально электромагнитное реле представляет собой возбуждаемый слабым электрическим током небольшой электромагнит, железный сердечник которого при возбуждении притягивает легкий железный якорь, соединенный с контактной системой, осуществляющей замыкание или размыкание цепи рабочего тока.

По устройству контактной системы различают одноконтактные, двухконтактные и многоконтактные реле.

По положению контактной системы в обесточенном реле различают реле с нормально разомкнутыми контактами, у которых замыкание контактов происходит при возбуждении электромагнита реле, и реле с нормально замкнутыми контактами, где, наоборот, при возбуждении реле контакты рабочей цепи размыкаются.

Двух- и многоконтактные реле могут иметь часть контактов нормально замкнутыми, а другую часть нормально разомкнутыми.

Возвращение якоря в исходное положение при обесточивании реле выполняется или действием пружины, нагружающей якорь, или весом самого якоря.

Якорь может быть или притягивающимся, поворачивающимся на некоторый угол, или втягивающимся, имеющим поступательное движение параллельно самому себе.

На рис. 306 приведены схемы электромагнитных реле главных типов.

Рис. 306, *а* показывает двухконтактное реле с нормально разомкнутым контактом и поворачивающимся якорем, нагруженным пружиной. Реле состоит из электромагнита *1*, якоря *2*, вращающегося вокруг оси *3* и удерживаемого пружиной *4*, и контакта *5* рабочей цепи. *I* — цепь управления, *II* — рабочая цепь.

На рис. 306,*b* представлена схема реле двухконтактного с нормально замкнутым и нормально разомкнутым контактами и поворачивающимся якорем, действующим собственным весом.

Рис. 306, *с* показывает двухконтактное реле с нормально замкнутым и нормально разомкнутым контактами и втягивающимся якорем, действующим собственным весом.

Как видно из сказанного, действие электромагнитного реле продолжается, пока в его катушке течет ток, т. е. пока замкнут контакт командного импульса, что обычно продолжается весьма короткое время.

Реле с самоблокировкой. Однако в ряде случаев действие регулятора требует длительного прохождения рабочего тока. Для выполнения этого требования применяется реле с самоблокировкой, возбуждающееся при подаче короткого командного импульса и остающееся возбужденным до подачи другого выключающего импульса.

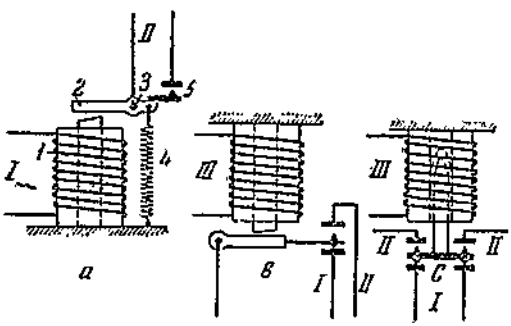


Рис. 306. Схемы электромагнитных реле:

а) 1 — электромагнит; *2* — якорь; *3* — ось якоря; *4* — пружина; *5* — рабочий контакт; *I* — цепь управления; *II* — рабочая цепь; *b) и с) I* — первая рабочая цепь; *II* — вторая рабочая цепь; *III* — управляющая цепь.

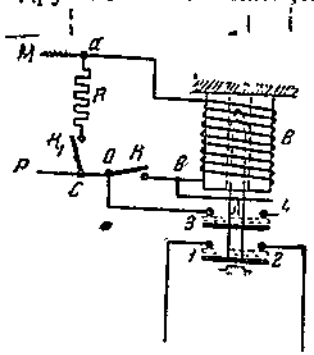


Рис. 307. Реле с самоблокировкой:

А — втягивающийся якорь; *В* — катушка возбуждения; *Р—М* — цепь управляющего тока; *К* и K_1 — управляющие контакты; *R* — шунтирующее сопротивление; *1—2*—контакты рабочей цепи; *3—4* — блокировочные контакты.

На рис. 307 дана схема реле с самоблокировкой. Реле состоит из катушки возбуждения *В* со втягивающимся якорем *А* и двух пар нормально разомкнутых контактов: *1—2* — кон-

такты цепи рабочего тока и *3—4*— блокировочные контакты. Катушка *B* питается от цепи управляющего тока *P—M*. При подаче командного импульса замыканием контакта установится цепь тока *P—a—K—b—M*. Катушка возбудится и втянет якорь *A*, причем замкнутся контакты *1—2* и *3—4*.

При размыкании контакта *K* катушка *B* останется под током, так как будет образована цепь *P—a—3—4—M*. Реле останется возбужденным до подачи второго командного импульса замыканием контакта K_1. При замыкании контакта K_1 катушка электромагнита реле шунтируется сопротивлением *R*.

Так как величина сопротивления *R* значительно меньше сопротивления катушки *B* реле, через катушку реле пойдет очень малая часть тока. Магнитное поле катушки уменьшится настолько, что не будет в состоянии удерживать якорь *A*. Последний отпадет, разорвав блокировочную цепь и цепь рабочего тока. Катушка реле обесточится до новой подачи командного импульса замыканием контакта *K*. Таким образом, подача короткого командного импульса, вызвав срабатывание реле, заставит реле оставаться в возбужденном состоянии неограниченное время до подачи второго размыкающего командного импульса контактом K_1.

Реле с выдержкой времени. В отдельных случаях требуется, чтобы реле срабатывало, т. е. замыкало рабочие контакты по истечении некоторого времени после подачи командного импульса. Для этого применяются реле с выдержкой времени.

Устройство реле с выдержкой времени основано на торможении якоря реле при помощи того или иного устройства. Торможение осуществляется силами инерции тяжелой массы, сопротивлением воздуха вращению крыльчатки или жидкостными демпферами.

На рис. 308 дана кинематическая схема инерционного реле. В момент возбуждения катушки сердечник реле притягивает легкий якорек *1*, растягивая пружину *2*, связывающую якорь *1* с тяжелым якорем *3*, несущим рабочие контакты *4*. Якорь *3* перемещается под действием натяжения пружины *2* тем медленнее, чем больше его масса, и замыкает в конце своего движения контакты *4*. Выдержка времени, осуществляемая этим типом реле, составляет 0,1—1,0 сек. в зависимости от массы якоря и натяжения пружины.

На рис. 309 изображена схема реле с выдержкой времени с воздушным торможением. Это реле, как и предыдущее, имеет два якоря *1* и *3*, связанные пружиной *2*. Якорь *3* несет на себе рабочие контакты *4* и зубчатый сектор *5*, сцепляющийся с двойной зубчатой передачей *6—7*. На оси шестерни *7* насажена крыльчатка *8*. Притянутый при возбуждении катушки реле якорь *1* растягивает пружину *2*. Натяжение пружины заставляет перемещаться якорь *3*. Скорость перемещения якоря *3* определяется сопротивлением воздуха быстро вращающейся крыльчатке *8*. В зависимости от натяжения пружины и передаточного числа шестеренной передачи *5—7* выдержка времени этим реле может колебаться от 0,5 до 10 сек.

Принципиальная схема реле с жидкостным демпфером представлена на рис. 310. Втягиваемый сердечник *1* реле связан пружиной *2* со штоком поршня *3*, движущегося в цилиндре *4*, заполненном жидкостью. При движении поршня жидкость перетекает из одной полости цилиндра в другую через малые отверстия в поршне.

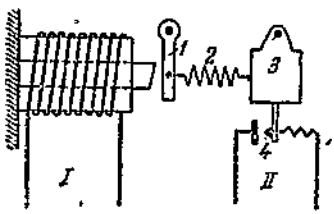


Рис. 308. Инерционное реле с выдержкой времени:

1 — легкий якорь; *2*—пружина; *3*—тяжелый якорь; *4*—рабочие контакты; *I* — управляющая цепь; *II* — рабочая цепь.

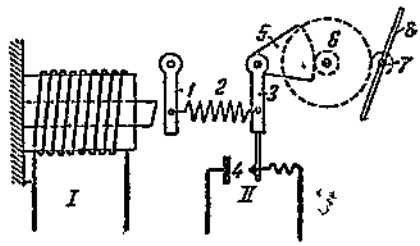


Рис. 309. Реле с воздушным торможением:

1 и *3* — якоря; *2* — пружина; *4* — рабочие контакты; *5* — зубчатый сектор; *6*—*7* — зубчатая передача; *8* — крыльчатка; *I* — управляющая цепь; *II* — рабочая цепь.

Скорость движения поршня зависит от величины отверстий и вязкости жидкости. Пружина *5* служит для возвращения поршня в исходное положение при обесточивании катушки реле. Шток поршня демпфера несет рабочий контакт *6*. Выдержка времени этим реле составляет от 0,5 до 5 сек.

Моторные реле времени. Более длительные выдержки времени, необходимые в программных и циклических реле, осуществляются часовым механизмом или, что удобнее, синхронным мотором Уоррена.

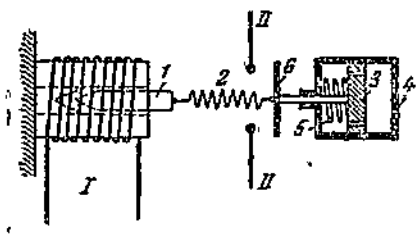


Рис. 310. Реле с гидравлическим демпфером:

1 — втягиваемый сердечник; *2*—пружина; *3* — поршень; 4 — цилиндр; *5* — возвратная пружина; *6* — рабочие контакты; *I* — управляющая цепь; *II* — рабочая цепь.

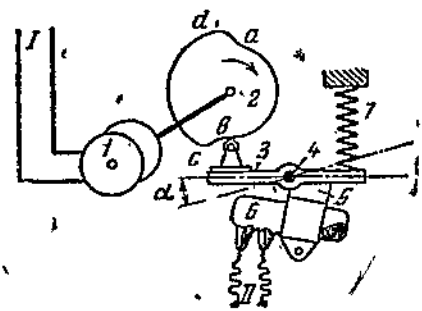


Рис. 311. Моторное реле времени:

1 — мотор Уоррена; *2* — кулачный диск; *3* — рычаг; *4* — ось вращения рычага; *5* — зажим; *6* — ртутный выключатель; *7* — пружина; *I* — управляющая цепь; *II* — рабочая цепь.

Схема простейшего реле времени с большой выдержкой изображена на рис. 311. Мотор Уоррена *1* пускается в ход ко-

мандным импульсом через промежуточное самоблокирующееся реле. Ось мотора Уоррена делает один оборот в назначенный промежуток времени (0,5; 1,0; 2,0; 5; 10 и т. д. минут). На оси мотора насажен кулачковый диск *2*, на боковую поверхность которого опирается ролик рычага *3*, вращающегося вокруг неподвижной оси *4*. К рычагу *3* зажимом *5* прикреплен ртутный контакт *6* (меркоид, свинка), замыкающий рабочую цепь тока *II*.

Действие реле заключается в следующем. При пуске мотора *1* от контактного импульса диск *2* начнет вращаться по часовой стрелке. По истечении определенного времени, зависящего от скорости вращения диска и длины дуги *ba*, выступ диска отожмет ролик рычага *3*, повернув его на угол α. Ртуть в меркоиде перельется в левый его конец и замкнет рабочую цепь тока. Продолжительность замыкания рабочего тока также определяется скоростью вращения диска и длиной дуги выступа *dc*. По окончании полного поворота диска пружина *7* вернет рычаг в начальное положение, рабочая цепь тока будет разомкнута. Одновременно контакт на оси мотора (не показанный на рисунке) пошлет выключающий импульс промежуточному реле, которое этим обесточится и выключит мотор Уоррена. Система придет в начальное состояние, подготовленная к приему нового командного импульса.

Реверсирующее реле времени завода «Пирометр». Реле времени с мотором Уоррена могут быть многоконтактными, выполняющими сложную программу переключений.

Примером таких сложных реле может служить реверсирующее реле времени завода «Пирометр», предназначенное для работы от контактного гальванометра с двухмоторным исполнительным механизмом. Реле (рис. 312) состоит из мотора Уоррена *M*, на валу *18* которого насажены пять кулачковых дисков *2, 4, 6, 10* и *16*, и четырех электромагнитов *24, 34, 39* и *43* с якорями *25, 35, 40* и *44*. Параллельно валу *18* расположен второй вал *17* с подвижно насаженными на нем меркоидами *1, 3, 5, 9* и *13*. Вал *18* соединен с мотором Уоррена муфтой.

Работа реле протекает следующим образом. При включении контактным гальванометром одного из контактов повышения или понижения температуры срабатывает один из двух электромагнитов — *34* или *39*. Предположим, что возбуждена катушка *34*. Якорь *35* будет притянут, освобождая рычаг *36*, который действием пружины повернет меркоид *5*, включающий мотор исполнительного механизма. Через короткий промежуток времени (0,25—1,0 сек.) гальванометр включит блок-контакт, замыкающий цепь катушки *43*. Якорь *44*, притянутый электромагнитом *43*, замкнет меркоидом *13* цепь мотора Уоррена. Мотор начнет вращать ось *18* с кулачковыми дисками. Через промежуток времени около *1* секунды гальванометр разорвет блок-контакт, обесточив электромагнит *43*.

Якорь электромагнита вернется в начальное положение пружиной, но меркоид *13* останется замкнутым, так как за это время вырез диска *16* сместится на некоторый угол и ролик рычага *14* не сможет вернуться в первоначальное положение, пока

диск *16*, а следовательно, и вал *18* не сделают полного оборота. По окончании полного оборота вырез диска *16* подойдет под ролик рычага *44*; последний под действием пружины станет в начальное положение и меркоид *13*, разорвав цепь питания, остановит мотор.

При вращении вала *18* диск *6* через определенный промежуток времени отожмет своим кулачком рычаг *36*, выключив меркоид *5* и тем самым остановив мотор исполнительного механизма; якорь *35* будет освобожден и пружиной возвращен в начальное

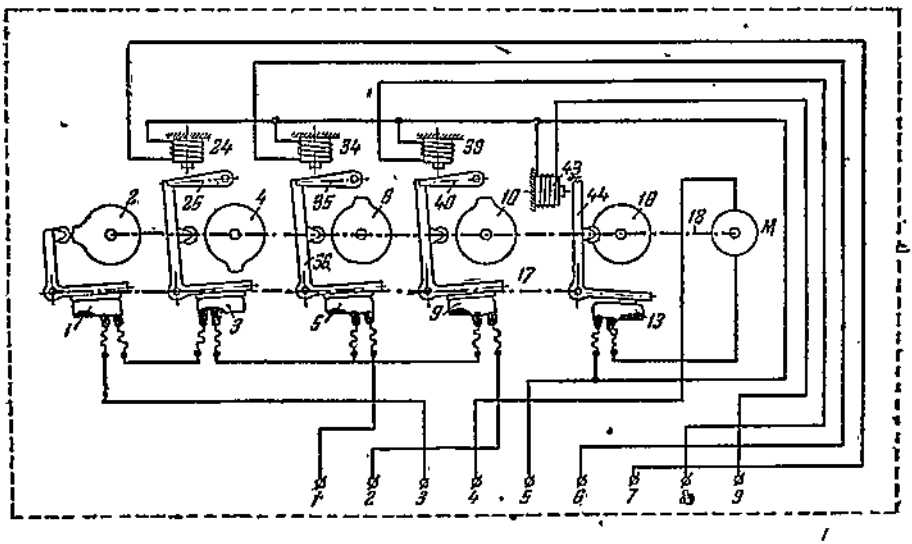


Рис. 312. Реверсирующее реле времени завода Пирометр:
M — мотор Уоррена; *1*, *3*, *5*, *9* и *13* — ртутные выключатели; *2*, *4*, *6*, *10* и *16* — кулачковые диски; *17* — вал выключателей; *18* — вал кулачковых дисков; *24*, *34*, *39* и *43* — электромагниты; *25*, *35*, *40* и *44* — якори электромагнитов; *36* — рычаг выключателя *9*; *44* — рычаг выключателя *13*.

положение, запирая тем самым рычаг *36*. Система регулятора придет при этом в исходное состояние.

Электромагнит *34* работает от контакта «повышенное значение показателя регулирования», электромагнит *39* от контакта «пониженное значение», а электромагнит *24* от контакта «нормальное значение».

Особенностью реле является совместное действие контакта «нормально» с контактами «повышено» или «понижено». Включение одного контакта «нормально» не приводит реле в действие, так как меркоид *3* включен в цепь последовательно с меркоидами *5* и *9*. При замыкании же гальванометром одновременно двух контактов: «нормально» и «повышено» или «нормально» и «понижено» вызывает одновременное срабатывание электромагнитов *34* и *24* или *39* и *24* и пуск исполнительного механизма.

Продолжительность работы исполнительного механизма может по желанию изменяться в пределах от 1 до 12 сек. Установка продолжительности работы исполнительного механизма производится перестановкой дисков *4*, *6* и *10*. Эти три диска насажены на вал *18* свободно и сцепляются с ним штифтами, укрепленными жестко на валу *18* и входящими в вырезы ободов дисков. Каждый диск имеет на своем ободе двенадцать вырезов, перенумерованных цифрами от 1 до 12. Сдвигая любой из этих трех дисков на валу влево, расцепляют диск от штифта, после чего он может быть повернут на валу на любой угол, кратный 30°.

Полный оборот вала *18* совершается в 15 сек. Цифры на ободах дисков показывают время включения меркоида *3* и выключения меркоидов *5* и *9* после пуска мотора Уоррена.

Перестановкой дисков можно установить любое время работы исполнительного механизма. Так, если установить диски *6* и *10* на 8 сек., то при замыкании контактов «повышено» или «понижено» мотор исполнительного механизма будет работать в течение 8 сек. Если же диски *6* и *10* установлены на 8 сек., а диск *4* на 3 сек., то при замыкании двух контактов «нормально» и «повышено» или «понижено» мотор исполнительного механизма будет работать 8—3=5 сек., вследствие того что меркоид *3* включится только через 3 сек. после начала работы реле.

Кроме перечисленных деталей реле имеет еще диск *2* с меркоидом *1*, являющиеся блокировочными. Меркоид *1* включен в цепь последовательно с меркоидом *3* и выключается в конце каждого оборота вала *18*.

Кроме этой блокировки имеется блокировочное устройство, исключающее возможность работы реле при открытой дверце. Это устройство состоит из рычага, нажимающего при открытой дверце на якорь электромагнита *43* и таким образом препятствующего включению меркоида *13*.

При закрытой дверце рычаг отводится соответствующим выступом дверцы, освобождая якорь электромагнита *43*.

Совместная работа этого реле с исполнительным механизмом будет изложена в разделе 67 «Исполнительные механизмы».

Электронные реле. Электронные реле используют свойство трехэлектродных электронных ламп усиливать слабые электрические импульсы.

Как известно, трехэлектродная лампа триод состоит из накаливаемого катода, холодного анода и расположенной между ними управляющей сетки.

Между анодом и катодом создается разность потенциалов при помощи подведения к ним напряжения от так называемой анодной батареи.

К сетке подводится напряжение усиливаемого импульса. В зависимости от знака и величины напряжения, подведенного к сетке, изменяется величина анодного тока, протекающего между анодом и катодом.

Величина усиления лампы определяется ее «сеточной характеристикой».

На рис. 313 изображена сеточная характеристика электронной лампы. На оси абсцисс в обе стороны от начала координат откладываются значения положительного и отрицательного потенциала, накладываемого на сетку; на оси ординат — значения величины анодного тока при данной разности потенциалов между анодом и катодом.

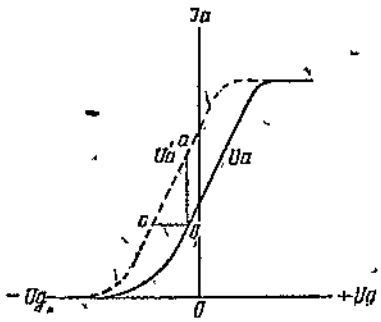


Рис. 313. Сеточная характеристика электронной лампы.

На рис. 313 приведены две кривые зависимости анодного тока от потенциала сетки — сплошная при анодном напряжении, равном U_a, и пунктирная при большем анодном напряжении, равном U'_a.

Как видно из этих кривых, величина анодного тока при данном потенциале сетки тем больше, чем выше анодное напряжение.

Обозначим величину ab, выражающую увеличение анодного тока при повышении анодного напряжения от U_a до U'_a, через ΔI_a; величину bc, выражающую уменьшение сеточного потенциала при увеличении анодного напряжения, через ΔU_g и приращение анодного напряжения $U'_a - U_a$ через ΔU_a.

Крутизна сеточной характеристики определится тангенсом угла наклона кривой, т. е.:

$$S = \frac{ab}{bc} = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}. \qquad (294)$$

Внутреннее сопротивление лампы:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}. \qquad (295)$$

Коэфициентом усиления лампы называется соотношение между приростом анодного и сеточного напряжения или величина прироста анодного напряжения на единицу сеточного напряжения. Коэфициент усиления обозначается буквой μ и является весьма важным параметром лампы, определяющим ее пригодность для работы в данной схеме:

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}. \qquad (296)$$

У современных электронных ламп коэфициент усиления бывает от 4 до 3000.

Коэфициент усиления можно определить, пользуясь крутизной сеточной характеристики и внутренним сопротивлением.

Произведение этих двух величин дает величину коэфициента усиления:

$$S \cdot R_i = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \cdot \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} = \mu, \qquad (297)$$

Величина μ представляет собой так называемый статический коэфициент усиления. Кроме него различают динамический коэфициент усиления:

$$K_0 = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a}, \qquad (298)$$

показывающий, во сколько раз пульсация напряжения на зажимах внешнего сопротивления R_a превышает напряжение, подведенное к сетке.

Анодный ток лампы будет равен анодному напряжению, деленному на сопротивление цепи. Сопротивление цепи лампы складывается из внутреннего сопротивления лампы R_i и сопротивления внешней цепи R_a, но анодное напряжение равно сеточному, помноженному на коэфициент усиления. Таким образом, можно написать:

$$I_a = \sim \frac{\mu U_g}{R_i + R_a}. \qquad (299)$$

$$\sim U_a = \sim I_a R_a = \frac{\mu U_g}{R_i + R_a} R_a. \qquad (300)$$

Отсюда:

$$\frac{U_a}{U_g} = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a} = K_0. \qquad (301)$$

Простейшая с х е м а у с и л е н и я приведена на рис. 314. К зажимам *I* и *II* подводится усиливаемое напряжение, накладывающееся на управляющую сетку.

Усиленный лампой анодный ток поступает во внешнюю цепь R_a, действуя либо на вторичное электромагнитное реле, либо на исполнительный механизм.

Применение электронного реле позволяет использовать для действия регулятора крайне слабые импульсы. Кроме того, действие реле протекает без расходования тока в цепи измерительного устройства, так как в цепи сетки ток не проходит.

Электронное реле времени. Электронные лампы позволяют осуществить р е л е с в ы д е р ж к о й в р е м е н и. На рис. 315 приведена принципиальная схема подобного реле. Реле состоит из электронной лампы (триода) *L*, конденсатора *C* и сопротивления *R*, параллельно включенных в шунт цепи сетки, электромагнитного реле *PM*, включенного в анодную цепь лампы, и контакта *K*.

В нормальных условиях контакт *K* замкнут и на сетку подан отрицательный потенциал. Лампа *L* заперта. При размыкании контакта *K* конден-

сатор C начнет разряжаться через сопротивление R. Потенциалы на обкладках конденсатора будут уменьшаться согласно соотношению:

$$U_t = U_0\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right), \qquad (302)$$

где U_t — потенциал на обкладке через промежуток времени, равный t;
U_0 — начальная величина потенциала;
e — основание натуральных логарифмов;
t — время в секундах;
R — сопротивление в омах;
C — емкость конденсатора в фарадах.

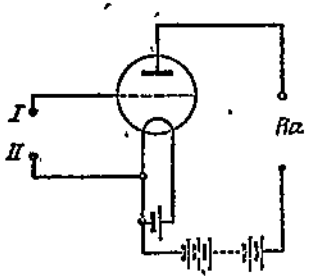


Рис. 314. Простейшая схема усиления:
I и II — зажимы; Ra — внешняя цепь.

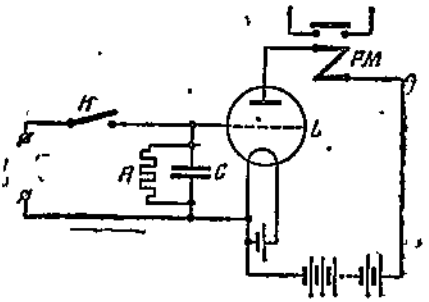


Рис. 315. Электронное реле с выдержкой времени:
L — электронная лампа; C — конденсатор; R — сопротивление; PM — электромагнитное реле; K — контакт.

По истечении определенного времени потенциал на сетке достигнет значения, при котором через лампу потечет ток, достаточный для срабатывания реле PM. Срабатывание реле PM вызовет нужное переключение рабочих контактов.

Выдержка времени определится из соотношения:

$$\tau \doteq RC \ln \frac{U_0}{D\,(U_a - i_r R_r) - \frac{1}{f_a^n}} + \tau_r, \qquad (303)$$

где τ — выдержка времени;
D — проницаемость лампы;
U_a — напряжение на аноде;
i_r — ток срабатывания реле;
R_r — сопротивление реле;
I_a — анодный ток;
n — коэффициент, зависящий от конструкции лампы;
τ_r — время запаздывания реле.

Остальные обозначения, как принято выше.

Фотореле. Применение фотоэлементов в качестве реле, усиливающих слабые первоначальные импульсы, в последнее время применяется все шире и шире. Существует большое количество схем фотореле, применяемых для регулирования процессов и аппаратов.

Большинство регулировочных схем фотореле основано на двух принципиально различных устройствах: 1) реле с отклонением луча света или с вращающимся зеркалом и 2) реле с прерыванием светового луча или с движущимся экраном.

Общая схема реле первой группы представлена на рис. 316. Фотореле состоит из постоянного источника света *1*, фотоэлемента *2* и вращающегося зеркала *3*, укрепленного на оси гальванометра или другого измерительного прибора.

При повороте зеркала на некоторый угол луч света от лампы *1* падает на фотоэлемент *2* или, наоборот, уходит от фотоэлемента.

При этом в цепи фотоэлемента возникает или прерывается ток, действующий на вторичное электромагнитное реле или, усиленный электронной лампой, непосредственно на исполнительный механизм.

Ничтожность силы, требующейся для перемещения зеркала, позволяет применять высокочувствительные измерительные приборы и выполнять регулирование с высокой точностью.

Фотореле второй группы (рис. 317) также состоит из источника света *1* и фотоэлемента *2*, но в реле этого типа луч света лампы *1* направлен непосредственно на фотоэлемент. Прерывание тока фотоэлемента производится прямолинейно движущимся непрозрачным экраном *3*, связанным с измерительным прибором.

Подобное реле применено в автоматическом ареометре, сист. Кацнельсона, описанном в гл. XIV (стр. 308).

Эти реле также нуждаются в очень слабом первоначальном импульсе и позволяют применять весьма чувствительные измерительные приборы.

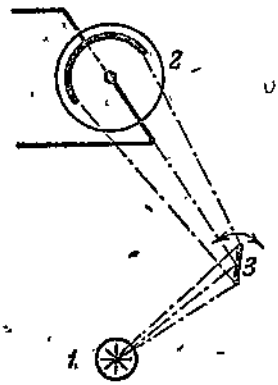


Рис. 316. Схема фотореле с отклонением луча:
1 — источник света; *2* — фотоэлемент; *3* — вращающееся зеркало.

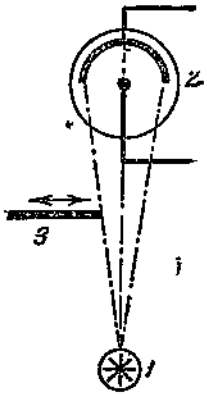


Рис. 317. Схема фотореле с прерыванием луча:
1 — источник света; *2* — фотоэлемент; *3* — перемещающийся экран.

Работа фотореле не производит никакого обратного действия на измерительный прибор, поэтому измерения могут вестись с любой точностью.

67. Исполнительные механизмы

Классификация. Перестановка регулирующего органа регулятора производится каким-либо силовым устройством, непосредственно связанным с регулирующим органом и способным развить необходимую перестановочную силу.

Эти силовые устройства носят общее название исполнительных механизмов.

Исполнительные механизмы являются машиной, производящей работу за счет энергии, поступающей к ней от какого-либо источника. Источниками энергии может быть земное притяжение, жидкость или газ под давлением или электрический ток.

В зависимости от используемой энергии исполнительные механизмы делятся на механические, гидравлические и электрические.

Каждая из этих групп исполнительных механизмов подразделяется по основному конструктивному признаку. Так, механические, или точнее, гидростатические исполнительные механизмы

подразделяют на поплавковые и колокольные механизмы. Гидравлические исполнительные механизмы делятся на мембранные и поршневые. Электрические исполнительные механизмы подразделяются на электромоторные и электромагнитные.

Механические, или гидростатические, исполнительные механизмы применяются исключительно в регуляторах прямого действия, совмещая функции измерительно-координирующего устройства с функциями исполнительного механизма.

Изменение показателя регулирования вызывает перестановку измерительного устройства — поплавка или колокола, плавающих в жидкости. Поплавок или колокол, жестко связанные с регулирующим органом, переставляют его в свою очередь, осуществляя процесс регулирования.

Поплавковые и колокольные механизмы были описаны в разделе 64 «Измерительно-координирующие устройства» и здесь нет необходимости повторять их описание.

Гидравлические исполнительные механизмы заимствуют энергию находящейся под давлением жидкости или сжатого воздуха.

Конструктивно жидкостные и воздушные исполнительные механизмы вполне тождественны, что делает излишним их деление по этому признаку. По конструкции рабочей части гидравлические исполнительные механизмы делятся, как указано выше, на мембранные и поршневые.

Мембранные исполнительные механизмы применяются в регуляторах прямого и непрямого действия. В регуляторах прямого действия они одновременно являются измерительными устройствами и в качестве последних описаны в разделе 64.

Мембранные исполнительные механизмы для регуляторов непрямого действия в основном имеют то же конструктивное выполнение, но обычно меньшие габариты, так как использование постороннего источника энергии позволяет располагать большими рабочими давлениями и получать достаточную перестановочную силу при меньших диаметрах мембраны.

Чаще всего делаются мембранные исполнительные механизмы одностороннего действия; обратный ход механизма осуществляется за счет груза или упругости пружины, действующих на мембрану.

Односторонний мембранный механизм выгодно отличается отсутствием сальника, но зато требует большей энергии для своей работы, так как давление на мембрану должно преодолеть сопротивление регулирующего органа и сопротивление пружины или груза. Обычно сила пружины или груза выбирается равной требуемой перестановочной силе регулирующего органа и, таким образом, сила, развиваемая мембраной, должна равняться двойной перестановочной силе.

В мембранных исполнительных механизмах двойного действия

сила мембраны равняется перестановочной силе, т. е. вдвое меньше, чем в предыдущем случае. Мембранные исполнительные механизмы с плоской мембраной обладают очень коротким ходом, что неблагоприятно для многопозиционного регулирования. Поэтому плоские мембраны в качестве исполнительных механизмов следует применять только в двух- и трехпозиционных регуляторах.

На рис. 318 изображены типы головок мембранных исполнительных механизмов в изготовлении РОСАТ к регуляторам прямого действия: для работы под давлением *a* и под вакуумом *b*.

Рис. 319 изображает конструкцию регулирующего клапана с мембранным исполнительным механизмом.

В многопозиционных регуляторах более целесообразны гармониковые мембраны (сильфоны), имеющие значительную величину хода.

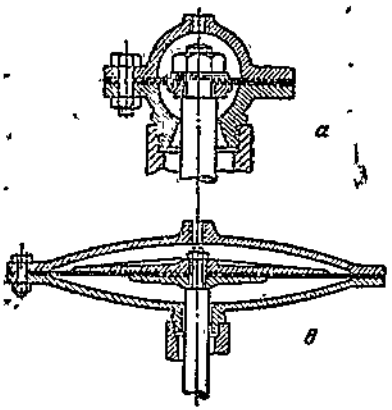


Рис. 318. Головки исполнительных мембранных механизмов: *a* — давления; *b* — вакуума.

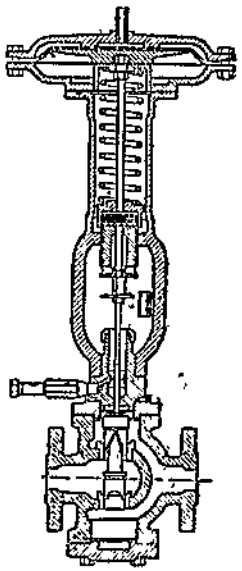


Рис. 319. Регулирующий клапан с мембранным исполнительным механизмом.

Поршневые исполнительные механизмы состоят из цилиндра, внутри которого движется поршень. Шток поршня, проходящий через сальник в крышке цилиндра, соединяется со штоком или рычагом регулирующего органа непосредственно или через кривошипную или рычажную передачу.

На рис. 320 представлена конструкция поршневого исполнительного механизма с кривошипной передачей завода КИП. Исполнительный механизм состоит из цилиндра *1*, присоединенного фланцем к закрытому картеру *2*. В цилиндре движется поршень *3* с шарнирно соединенным с ним шатуном *4*. Другой конец шатуна шарнирно связан с кривошипом *5*, сидящим на валу *6*. Вал выходит сквозь сальник из картера и несет на конце насаженный на шпонке диск. К диску крепится второй кривошип *7*, передающий движение поршня регули-

рующему органу. Кривошип 7 крепится к диску тремя болтами. Благодаря наличию на диске двенадцати отверстий для болтов кривошип 7 может быть укреплен в любом из 12 положений через каждые 30°, что облегчает присоединение исполнительного механизма к регулирующему органу.

Головка цилиндра и картер снабжены бобышками 8 и 9 для присоединения трубопроводов, подающих давление жидкости или воздуха. Механизм двухстороннего действия развивает при 4,7 *кг/см²* давления перестановочное усилие в 200 *кг*.

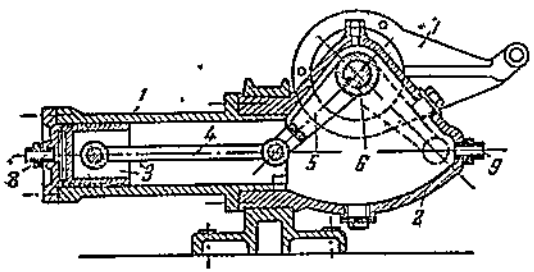


Рис. 320. Поршневой исполнительный механизм с кривошипной передачей:

1 — цилиндр; *2* — картер; *3* — поршень; *4* — шатун; *5* — кривошип; *6* — вал кривошипа; *7* — наружный кривошип; *8* и *9* — бобышки для трубопроводов к реле.

На рис. 321 изображен поршневой исполнительный механизм без кривошипной передачи завода КИП большей мощности. Конструкция и работа механизма понятны из рисунка и не требуют пояснений.

Данный тип исполнительного механизма развивает при давлении 4,7 *кг/см²* усилие в 500 *кг* и способен приводить в действие самые тяжелые типы регулирующих органов.

Электрические исполнительные механизмы, как упомянуто выше, делятся на две группы — электромоторные и электромагнитные.

В электромоторных механизмах основной частью является электромотор, выполняющий через редуктор или рычажную передачу перестановку регулирующего органа.

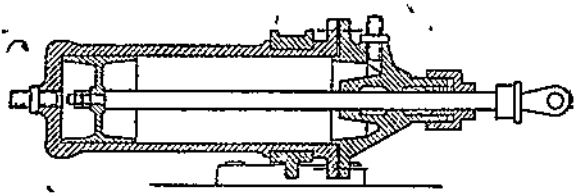


Рис. 321. Поршневой исполнительный механизм завода КИП Главкокса.

Электромоторные исполнительные механизмы представлены очень большим числом конструктивных типов, но это разнообразие может быть сведено по характеру работы механизма к четырем видам: 1) двухпозиционные, 2) трехпозиционные, 3) балансирные одномоторные и 4) балансирные двухмоторные механизмы.

Двухпозиционный исполнительный механизм переставляет регулирующий орган в одно из двух крайних положений — полного закрытия или полного открытия.

Трехпозиционный механизм имеет еще одно среднее положение, соответствующее нормальному значению показателя регулирования.

Одномоторный балансирный механизм является многопозиционным, так как перестановка клапана из одного крайнего положения производится им не в один или два приема, как в двух- и трехпозиционных механизмах, а в несколько десятков приемов. Остановка клапана возможна в любом из промежуточных положений.

Двухмоторные балансирные механизмы также многопозиционны, отличаясь характером движения регулирующего органа. Регулирующий орган быстро переставляется на определенную величину хода, дальнейшее же передвижение производится малыми шагами в несколько приемов.

Наиболее простым механизмом является двухпозиционный механизм фирмы Сименс-Гальске, схема которого изображена на рис. 322. Исполнительный механизм состоит из реверсивного мотора *1*, шестеренного редуктора *2*, конечных выключателей *3* и *4*. Механизм работает следующим образом. Измерительное устройство при отклонении значения показателя регулирования от нормы замыкает один из контактов *5* или *6*. При замыкании одного из контактов мотор начнет вращаться в определенную сторону, открывая или закрывая клапан *7*. Вращение мотора будет продолжаться до размыкания контакта *5* или *6* или до достижения клапаном своего крайнего верхнего или нижнего положения, когда выключается соответствующий конечный выключатель *3* или *4*.

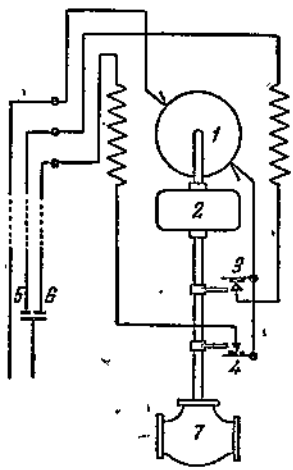


Рис. 322. Двухпозиционный механизм Сименс-Гальске:
1 — реверсивный мотор; *2* — редуктор; *3* и *4* — конечные выключатели; *5* и *6* — управляющие контакты; *7* — клапан.

Данный механизм имеет ряд недостатков, из которых наиболее существенными являются маломощность мотора и невозможность изменения передаточного числа редуктора, т. е. невозможность изменения скорости движения клапана.

Балансирные исполнительные механизмы отличаются характером перестановки регулирующего органа, выполняемой в два приема. Вначале регулирующий орган передвигается быстро на известную величину, а дальше происходит медленная перестановка до положения, соответствующего новым условиям.

Показатель регулирования приводится к нормальному значению плавно, без явлений перерегулирования, благодаря чему регулятор выдерживает заданное значение показателя регулирования весьма точно с очень малыми отклонениями.

Балансирные механизмы бывают двухмоторными и одномоторными. И те и другие могут быть одного из двух типов: двухпозиционные и трехпозиционные.

Завод «Метрон» строит балансирные механизмы двухмоторного и одномоторного типа.

Двухмоторный исполнительный механизм завода «Метрон» схематически представлен на рис. 323.

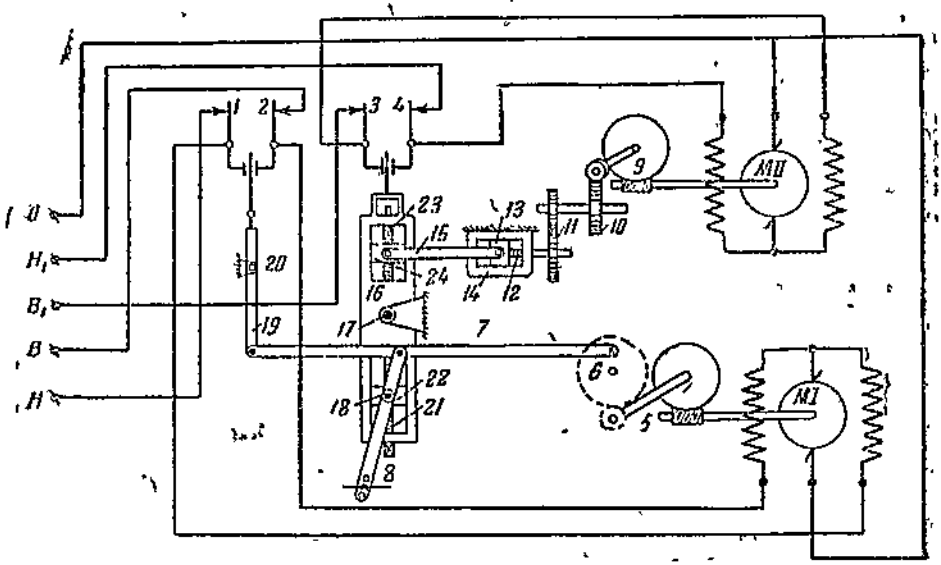


Рис. 323. Двухмоторный балансирный исполнительный механизм завода «Метрон»:

MI — мотор начального хода; *MII* — балансирный мотор; *B* и *H* — управляющие контакты; *1, 2* — конечные выключатели; *3, 4* — контакты балансирного мотора; *5* — червячная передача; *6* — кривошип; *7* — шатун; *8* — рычаг; *9—10* — двойная червячная передача; *11* — шестеренная передача; *12* — ходовой винт; *13* — гайка ходового винта; *14* — направляющие параллели; *15* — шатун; *16* — кулисса; *17* — ось кулиссы; *18* — ось вращения рычага *8*; *19* — рычаг; *20* — ось рычага *19*; *21* — ходовой винт; *22* — гайка; *23* — ходовой винт; *24* — гайка шатуна *15*.

Моторы механизма двухобмоточные реверсивные; мотор *M-I* — начального хода и мотор *M-II* — балансирный.

Работа механизма протекает следующим образом. При замыкании контактов «высоко» *B* или «низко» *H* включаются оба мотора. Допустим, включен контакт *B*. Мотор *M-I*, цепь которого замкнута через конечный выключатель *2*, червячно-шестеренной передачей *5* и кривошипом *6* передвигает шатуном *7* рычаг *8* в сторону закрытия регулирующего клапана. Одновременно через контакт *3* будет включен балансирный мотор, который двойной червячной передачей *9—10* и цилиндрической шестеренной передачей *11* будет вращать ходовой винт *12*.

Гайка *13*, передвигаясь по винту *12* в неподвижных направляющих параллелях *14*, будет при помощи шатуна *15* поворачивать кулиссу *16* вокруг неподвижной оси *17*. Поворот кулиссы

будет перемещать рычаг *8*, ось вращения которого *18* закреплена на кулиссе *16*, в ту же сторону, что и мотор *М-II*.

Однако так как передаточное число системы балансирного мотора *М-II* значительно больше передаточного числа мотора начального хода *М-I*, передвижение рычага *8* балансирным мотором будет гораздо медленнее, чем от мотора *М-I*. При достижении кривошипом колеса *6* левой мертвой точки рычаг *19*, шарнирно связанный с шатуном *7*, вращаясь вокруг неподвижной оси *20*, выключит контакт *2* и этим остановит мотор *М-I*. Балансирный мотор продолжает свое движение до тех пор, пока не будет выключен контакт *В*.

При новом замыкании измерительным прибором контакта *В* будет включен лишь балансирный мотор, так как цепь мотора начального хода разорвана выключателем *2*. Балансирный мотор будет работать в том же направлении, т. е. будет переставлять регулирующий клапан в сторону закрытия. Это будет повторяться до тех пор, пока установка клапана не будет соответствовать условиям режима.

При изменении режима процесса в другую сторону работа исполнительного механизма будет итти в той же последовательности, но в обратном направлении.

Исполнительный механизм завода «Метрон» очень гибок, позволяя наладку в широких пределах применительно к различным условиям регулирования.

Ось *18* рычага *8* может переставляться в прорези рычага ходовым винтом *21*, передвигающим гайку *22*, на которой укреплена ось *18*. Эта перестановка, изменяя отношение плеч рычага *8*, позволяет изменить амплитуду перестановки регулирующего органа. Перемещение оси шатуна *15* ходовым винтом *23* позволяет изменять величину перестановки регулирующего органа балансирным мотором. Рычаги, управляющие предельными выключателями, также поддаются регулировке для получения более раннего или более позднего срабатывания предельных выключателей.

Исполнительный механизм завода «Метрон» помещен в литую чугунную коробку с крышкой. Максимальная длина хода конца рычага *8* 150 *мм*; тяговое усилие на конце рычага 20 *кг*.

Однодвигательный балансирный исполнительный механизм завода «Метрон». Кроме двухмоторных механизмов завод «Метрон» выпускает однодвигательный механизм, кинематическая и электрическая схема которого приведена на рис. 324.

Механизм работает следующим образом. Реверсивный двухобмоточный мотор *1* вращает через червячную передачу *2* вал *3*, несущий на себе шестерню *4* и червяк *5*. Шестерня *4* сцеплена с зубчатым колесом *6*. В зубчатом колесе *6* встроено фрикционное зацепление, состоящее из двух кулаков *7*, сцепляющихся с ободом колеса *6* при помощи двух роликов *8*, раздвигаемых пружиной *9*. При вращении колеса *6* по часовой стрелке ролик *8* будет зажат между ободом и скосом кулака *7*, увлекая последний во вращение. Ролик *8'* будет свободно катиться по ободу. При вра-

щении колеса *6* против часовой стрелки в зацепление войдет ролик *8'*. В обоих случаях сцепление и поворот кулаков будет продолжаться до тех пор, пока заклиненный ролик в своем движении не встретится с неподвижным упором *10*. Упор отожмет ролик, выведет его из зацепления с кулаком и кулак остановится.

Кулаки *7* снабжены кривошипом *11*, соединенным с шатуном *12*, поворачивающим при движении кулаков рычаг *13* вокруг оси *14*. Рычаг *13* своим движением переставляет регулирующий орган.

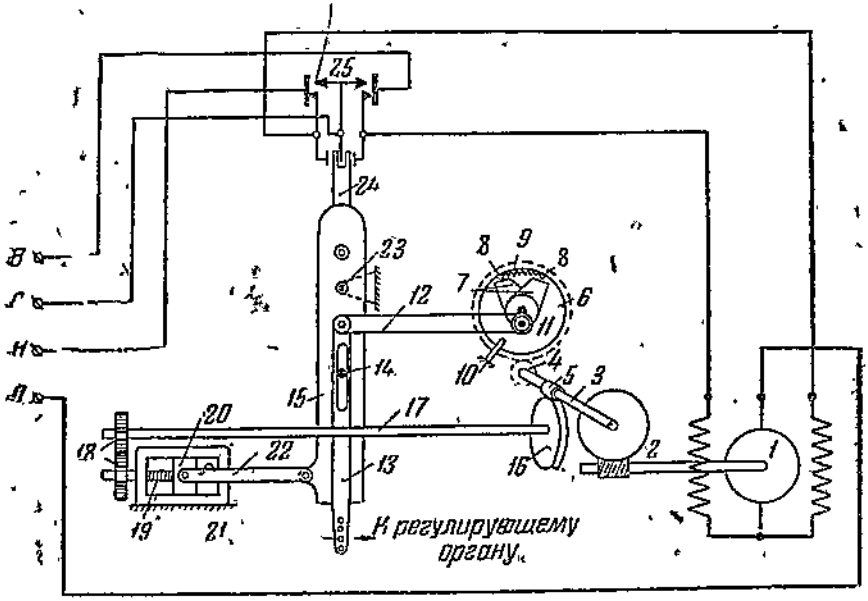


Рис. 324. Одномоторный балансирный исполнительный механизм завода «Метрон»:

1 — реверсивный мотор; *2* — червячная передача; *3* — вал; *4* — шестерня; *5* — червяк; *6* — зубчатое колесо; *7* — включающие кулаки; *8*, *8'* — ролики; *9* — пружинка; *10* — упор; *11* — кривошип; *12* — шатун; *13* — рычаг; *14* — ось рычага; *15* — плита; *16* — червячное колесо; *17* — вал; *18* — зубчатая передача; *19* — ходовой винт; *20* — камень кулиссы; *21* — параллели; *22* — соединительная тяга; *23* — ось вращения плиты *15*; *24* — рычаг; *25* — предельный выключатель.

Ось *14* укреплена в ползуне, передвигающемся ходовым винтом по плите *15*. Передвижение оси *14* в прорезе рычага *13* изменяет отношение плеч рычага и амплитуду перестановки регулирующего органа.

Червяк *5*, сидящий на валу *3*, сцеплен с червячным колесом *16*, вращающим при помощи вала *17* и зубчатой передачи *18* ходовой винт *19*. Винт *19* передвигает ползун *20*, двигающийся по неподвижным параллелям *21*. Ползун *20* шарнирно соединен при помощи тяги *22* с плитой *15*, так что при своем движении может поворачивать плиту *15* вокруг неподвижной оси *23*, создавая дополнительное передвижение рычага *13*, аналогично действию ба-

лансирного мотора в двухмоторном механизме. Плита *15* соединена рычагом *24* с предельным выключателем *25*.

Рассматривая электрическую схему, легко убедиться, что мотор механизма будет работать при повторных включениях какого-либо контакта, т. е. схема работы этого механизма аналогична работе трехпозиционного механизма.

Этот механизм является универсальным, так как может быть использован как одномоторный балансирный, двухмоторный балансирный трехпозиционный и двухмоторный балансирный двухпозиционный.

Для работы по циклу двухмоторного двухпозиционного балансирного механизма контакт *С* остается свободным, т. е. средний контакт предельного выключателя не работает.

Для работы в качестве одномоторного балансирного механизма выключается контакт *4* и из фрикционной муфты вынимаются ролики *8* и *8'* и пружина *9*, чем устраняется работа мотора начального хода.

Настройка для работы по циклу двухмоторного трехпозиционного балансирного механизма показана на рис. 324.

Другой тип двухмоторного исполнительного механизма представлен на рис. 325. Механизм заключен в чугунный эллиптический корпус *1*, внутри которого размещены два электромотора (переднего и заднего хода) *2*, сидящие на общем валу *3*, шестеренный редуктор *4* и рабочий вал *5*. Рабочий вал на конце, выходящем из корпуса, снабжен муфтой *6* с кривошипом *7*. Кроме того, рабочий вал приводит в движение плунжер *8*, совершающий возвратно-поступательное движение. Внутри корпуса на другом конце рабочего вала находится выключательное устройство *9*, могущее работать по двухпозиционному или пропорциональному циклу.

При двухпозиционной работе выключатель останавливает действующий мотор после полуоборота рабочего вала, когда кривошип *7* и плунжер *8* переместятся из крайней верхней в крайнюю нижнюю точку. При пропорциональном регулировании выключение мотора и величина перемещения кривошипа и плунжера зависят от величины отклонения регулируемого параметра от заданного значения.

Регулирующий орган связывается либо с пальцем кривошипа, либо с плунжером исполнительного механизма.

Этот тип исполнительного механизма весьма компактен и удобен для установки на регулирующих клапанных устройствах.

Электромагнитные исполнительные механизмы. Электромагнитные исполнительные механизмы в основе имеют электромагнит со втягивающимся сердечником типа тормозных магнитов.

Якорь электромагнита шарнирно соединен с рычажной передачей, действующей на шпиндель клапана или другого регулирующего органа.

Обычно электромагнитные механизмы являются двухпозиционными, так как движение сердечника электромагнита обусловливает лишь два положения: «втянут» и «отпущен».

Применение электромагнитных механизмов ограничено случаями необходимости быстрого открытия или закрытия клапанов малых диаметров. Использование электромагнитных механизмов для более тяжелых клапанов нецелесообразно вследствие громоздкости устройства, больших пусковых токов при малом на-

чальном усилии и низкого коэфициента мощности на переменном токе.

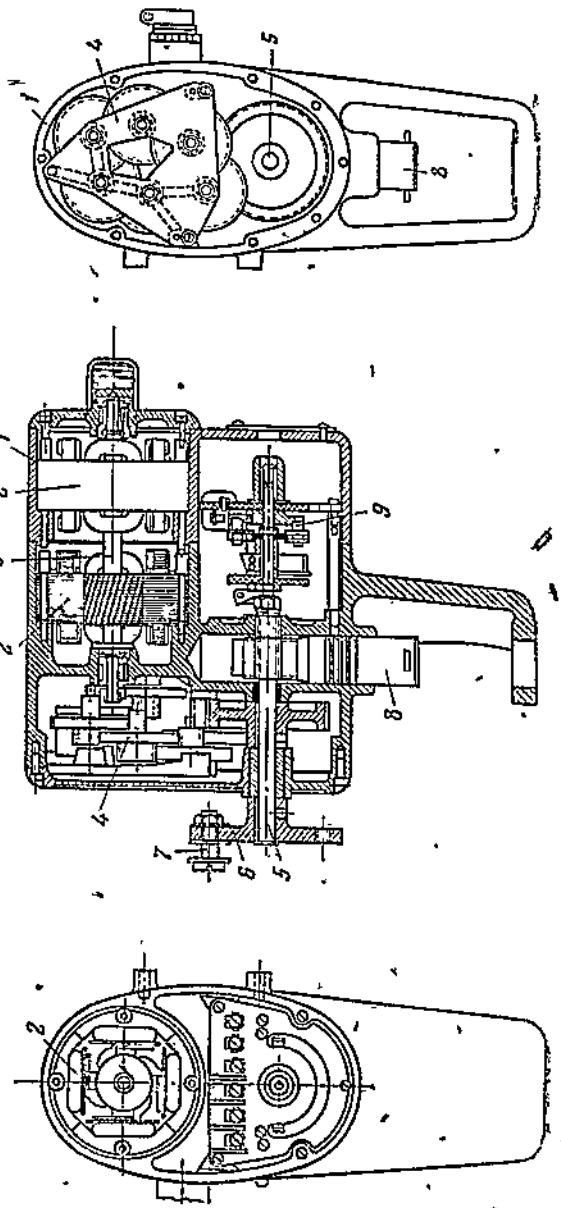


Рис. 325. Двухмоторный исполнительный механизм:
1 — чугунный корпус; *2* — электромоторы; *3* — общий вал электромоторов; *4* — шестеренный редуктор; *5* — рабочий вал; *6* — муфта; *7* — кривошип; *8* — плунжер; *9* — выключательное устройство.

Электромагнитный механизм с двумя магнитами может осуществить трехпозиционный цикл, как это изображено на рис. 326. Работа этой схемы идет следующим образом. При выключенных обоих магнитах — клапан закрыт. Включение одного

магнита *I* вызовет подъем клапана на половину полного хода; включение обоих магнитов — предельное поднятие клапана. Наличие двух магнитов делает устройство еще более громоздким и поэтому невыгодным.

68. Обратная связь

Общие сведения. Обратной связью называется устройство, осуществляющее воздействие регулирующего органа или исполнительного механизма на измерительно-координирующее устройство или на реле.

Целью устройства обратной связи является исключение возможности перерегулирования, т. е. перестановки регулирующего органа на величину бо́льшую, чем необходимо для возвращения показателя регулирования к нормальному значению.

Явление перерегулирования и связанного с ним раскачивания регулируемого процесса наблюдается довольно часто, особенно в системах с малой инерцией.

Неизбежное запаздывание измерительно-координирующего устройства и связанных с ним частей регулятора вызывает (в неустойчивых процессах с значительными колебаниями показателя регулирования) запаздывание воздействия регулятора на регулируемый агент, а это приводит к увеличению амплитуды колебаний показателя и к чрезмерно энергичному действию регулятора.

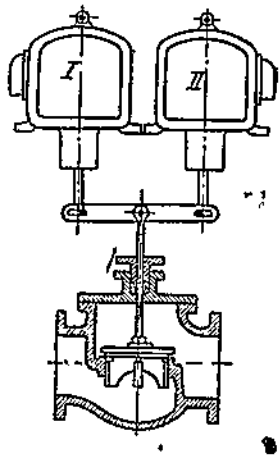


Рис. 326. Трехпозиционный электромагнитный исполнительный механизм:
I и *II*—электромагниты.

Введение в систему обратной связи делает регулирование несколько замедленным, но зато более плавным, подводящим показатель регулирования к норме без скачков.

Механизмы обратной связи делятся по способу действия на жесткие и эластичные, а по устройству на чисто механические, гидравлические и электрические.

Жесткая обратная связь. Жесткая обратная связь (рис. 327) представляет собой простейшую форму устройства. Измерительная мембрана *1*, действуя на рычаг *2*, переставляет золотниковое реле *3*. Рычаг *2* вращается при этом вокруг оси *O* как неподвижной точки опоры. Перестановка золотника *3* вызовет перемещение поршня исполнительного механизма *4*, со штоком которого связан шарниром *O* рычаг *2*. Движение штока поршня повлечет за собой перестановку золотника в обратном направлении, так как рычаг *2* будет вращаться вокруг оси *a*, являющейся в данном случае неподвижной опорой. Перемещение золотника в обратном направлении остановит исполнительный механизм.

Жесткая обратная связь применяется преимущественно в скоростных регуляторах. Для регулировки технологических процессов она мало пригодна, так как создает резкие колебания регулятора.

Жесткая обратная связь может быть осуществлена с помощью гидравлической передачи (рис. 328). Измерительная мембрана *1*, переставляя струйную трубку *2* реле, приведет в действие исполнительный поршневой механизм *3*. Рычаг *4*, связанный шарнирно со штоком поршня и имеющий неподвижную точку опоры *О*, сожмет или растянет сильфонную мембрану *5*, соединенную с аналогичной мембраной *6* трубкой *7*. Полости обеих мембран *5* и *6* и соединительный трубопровод между ними полностью заполнены жидкостью. При растяжении или сжатии мембраны *5* будет соответственно сжата или растянута мембрана *6*,

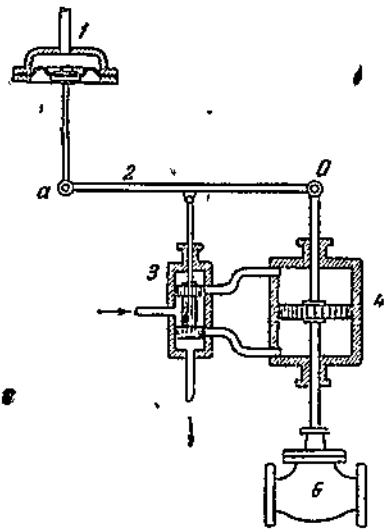


Рис. 327. Жесткая обратная связь:

1 — измерительная мембрана; *2* — рычаг; *3* — золотниковое реле; *4* — исполнительный механизм; *5* — регулирующий клапан.

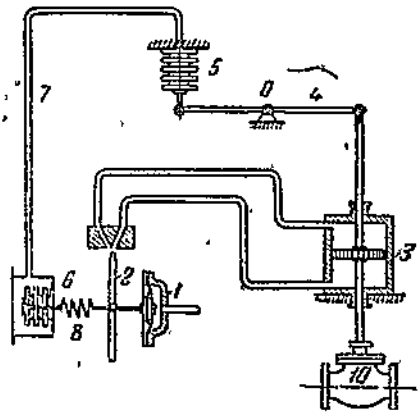


Рис. 328. Жесткая обратная связь с гидравлической передачей:

1 — измерительная мембрана; *2* — струйное реле; *3* — поршневой исполнительный механизм; *4* — рычаг; *5*, *6* — сильфоны; *7* — соединительная трубка; *8* — пружина.

которая, изменяя натяжение пружины *8*, передвинет струйную трубку *2* в обратном направлении, что остановит работу исполнительного механизма. Гидравлическая обратная связь обладает недостатком, зависящим от свойств заполняющей мембраны среды. При заполнении системы жидкостью большие разности высот расположения обеих мембран нарушают правильность действия. При заполнении системы газом нарушение правильности работы вызывается тепловым расширением газа.

Упругая обратная связь. Упругая или гибкая обратная связь, применяемая в большинстве систем регуляторов, может быть рычажной и гидравлической. На рис. 329 представлена схема упругой рычажной обратной связи.

Устройство состоит из измерительной мембраны *1*, соединенной тягой *2* с рычагом *3*. В свою очередь рычаг *3* шарнирно соединен с тягой *4* золотника *5* и со штоком поршня гидравлическо-

го катаракта *6*. Цилиндр катаракта жестко связан со штоком поршня исполнительного механизма *7*. Шток поршня катаракта *6* подвешен к пружине *8*, закрепленной к неподвижной точке *О*.

Перестановка золотника *5* мембраной *1* вызовет действие исполнительного механизма, поршень которого будет увлекать с собой цилиндр и поршень катаракта. Движение поршня катаракта повлечет перестановку золотника в обратном направлении и остановку исполнительного механизма. После остановки исполнительного механизма упругость сжатой или растянутой пружины *8* заставит поршень катаракта медленно передвинуться в соответствующем направлении, причем жидкость из одной половины цилиндра катаракта будет перетекать в другую по каналу *9* через регулируемое малое отверстие *10*. Перемещение поршня катаракта вызовет новую перестановку золотника в первоначальном направлении и новое движение исполнительного механизма и т. д.; в конце концов поршень исполнительного механизма и с ним вместе регулирующий орган займут некоторое положение, соответствующее значению показателя регулирования, а поршень катаракта и золотник реле займут среднее положение.

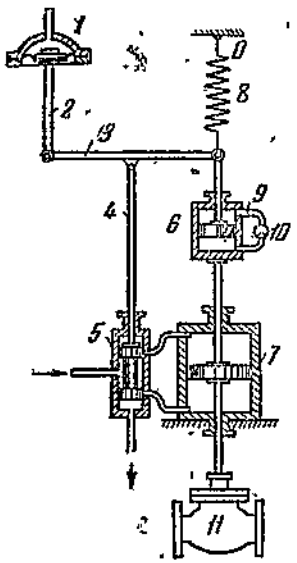


Рис. 329. Упругая обратная связь:
1 — измерительная мембрана; *2* — тяга; *3* — рычаг; *4* — тяга золотника; *5* — золотниковое реле; *6* — гидравлический катаракт; *7* — поршневой исполнительный механизм; *8* — пружина; *9* — канал катаракта; *10* — регулируемый дроссель; *11* — регулирующий клапан.

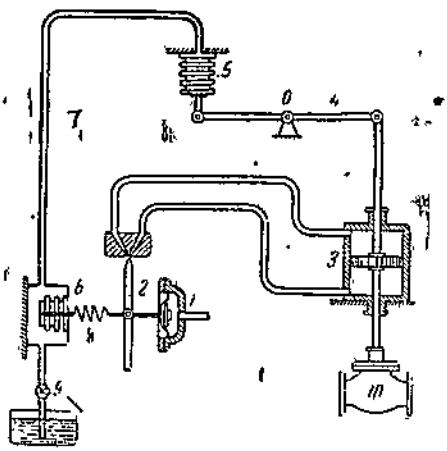


Рис. 330. Упругая обратная связь с гидравлической передачей:
1 — измерительная мембрана; *2* — струйные реле; *3* — исполнительный механизм; *4* — рычаг; *5, 6* — сильфоны; *7* — соединительная трубка; *8* — пружина; *9* — регулируемый дроссель.

Схема упругой обратной связи с гидравлической передачей приведена на рис. 330. Действие ее основано также на вытекании или впуске жидкости в систему через

малое регулируемое отверстие *9*. Быстрые перемещения поршня исполнительного механизма передаются мембранами беспрепятственно, возвращение же реле в среднее положение выполняется с замедлением.

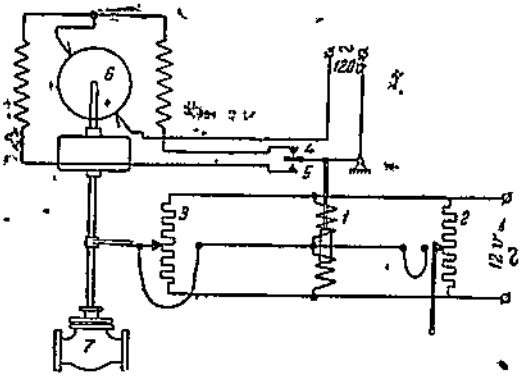


Рис. 331. Жесткая обратная связь в электрическом регуляторе:

1 — дифференциальное реле; *2* и *3* — потенциометры; *4* и *5* — контакты; *6* — реверсивный мотор; *7* — регулирующий клапан.

Механизм обратной связи может быть создан и в электрических схемах регулирования. В этом случае осуществима и жесткая и упругая связь.

На рис. 331 представлен пример жесткой связи в электрической схеме регулятора. Основной частью регулятора является дифференциальное реле *1*, параллельно которому включены потенциометры *2* и *3*. Когда движки этих потенциометров стоят посредине, якорь реле *1* занимает среднее симметричное положение относительно катушек.

Движок потенциометра *2* связан с измерительным прибором, так что при изменении показателя регулирования движок перемещается по потенциометру *2* в том или другом направлении.

Соответственно изменяется распределение токов в катушках дифференциального реле *1* и якорь его втягивается в верхнюю или нижнюю катушку, замыкая один из контактов *4* или *5*.

Реверсивный мотор *6* начинает работать, закрывая или открывая клапан *7*. Вместе с клапаном начинает перемещаться движок потенциометра *3*, связанный со штоком клапана, в направлении, противоположном перемещению движка потенциометра *2*. В результате в катушках реле *1* восстанавливается равенство токов, якорь реле занимает среднее положение, размыкая контакт *4* или *5*, мотор останавливается, установив клапан в положении, соответствующем новому значению показателя регулирования.

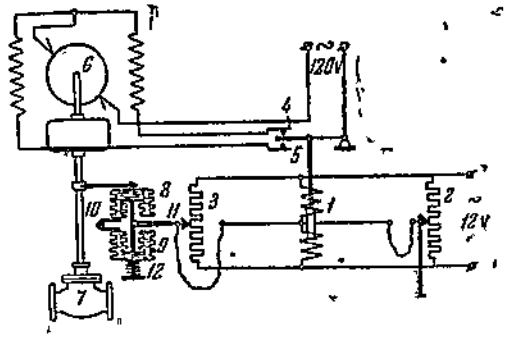


Рис. 332. Упругая обратная связь в электрическом регуляторе:

1 — дифференциальное реле; *2* и *3* — потенциометры; *4* и *5* — контакты; *6* — реверсивный мотор; *7* — регулирующий клапан; *8* и *9* — сильфоны; *10* — регулируемый дроссель; *11* — точка обратной связи; *12* — пружина.

Схема устройства упругой связи приведена на рис. 332. Устройство упругой связи в основном тождественно с предыдущим. Отличие заключается в том, что движок сопротивления *3* связан со штоком клапана гидравлическим катарактом. Катаракт состоит из двух сильфонных мембран *8* и *9*, полости которых, заполненные жидкостью, соединены каналом с регулируемым дроссельным клапаном *10*. Возвращение точки обратной связи *11* к исходному положению осуществляется пружиной *12* и упругостью самих сильфонов.

ГЛАВА XVII

РЕГУЛЯТОРЫ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

69. Поплавковые регуляторы

Общие сведения. Регуляторы прямого действия развивают необходимую для перестановки регулирующего органа мощность непосредственно за счет изменения показателя регулирования. Перестановочная сила создается отклонением показателя регулирования от его нормального значения. Это обстоятельство весьма сильно ограничивает область применения регуляторов прямого действия, так как они могут регулировать лишь такие параметры процесса, изменение которых способно создать достаточно мощный импульс.

Такими параметрами являются: уровень жидкости, давление и температура.

По принципу устройства регуляторы прямого действия разделяются на поплавковые, колокольные и мембранные.

Поплавковые регуляторы применяются, главным образом, для регулирования уровня жидкости.

Для регулирования давления или расхода применяются колокольные и мембранные регуляторы, а в качестве терморегуляторов — мембранные устройства.

Принцип действия поплавковых регуляторов сводится к тому, что поплавок, плавающий на поверхности жидкости, будет следовать за перемещениями этой поверхности и переставлять связанный с ним непосредственно или помощью рычажной передачи регулирующий орган. Инерция поплавка в значительной степени уравновешивается движением жидкости и регулирование устойчиво, так как всегда имеется положительное значение неравномерности.

Вредное действие оказывает сопротивление движению поплавка, вызываемое трением в сальниках, шарнирах и направляющих. Указанные сопротивления вызывают задержку поплавка при изменении положения уровня, и перемещение поплавка начинается с запозданием, после приращения перестановочной силы на величину, достаточную для преодоления трения. Таким образом, поплавок начинает двигаться лишь после изменения уровня на некоторую величину. После начала движения сила трения уменьшается, так как коэфициент трения движения меньше коэфициента трения покоя. Поплавок вследствие этого приобретает ускоре-

ние, заставляющее его переместиться на величину бо́льшую, чем изменение уровня. Регулирование происходит при этом толчками и при известных условиях с длительными колебаниями. Поэтому необходимо стремиться к уменьшению в конструкции регуляторов количества пар трения и уменьшению трения каждой пары.

Регулятор уровня Ганнемана. Регулирование уровня жидкости в каком-либо сосуде или аппарате выполняется дросселированием притока или отвода жидкости. Дросселирование притока жидкости встречается чаще, и большинство регуляторов уровня устраивают на линии приточного трубопровода.

Регулятор уровня воды Ганнемана (рис. 333) служит для стабилизации уровня воды в паровом котле. Регулятор состоит из

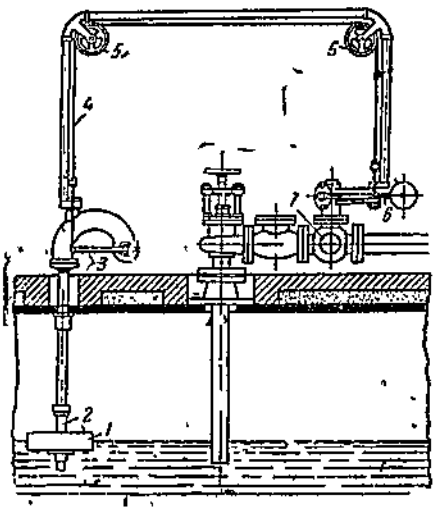


Рис. 333. Регулятор уровня Ганнемана:

1 — поплавок; *2* — шток поплавка; *3* — рычаг; *4* — стальная лента; *5* — ролики; *6* — рычаг клапана; *7* — регулирующий клапан.

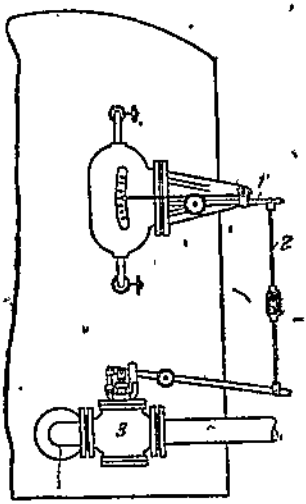


Рис. 334. Регулятор уровня РОСАТ:

1 — рычаг с противовесом; *2* — тяга; *3* — регулирующий двухседельный клапан.

поплавка *1* значительного объема, связанного штоком *2* с изогнутым рычагом. Ось рычага проходит через сальник в стенке кожуха регулятора и несет на себе жестко насаженный наружный рычаг *3*. Последний связан стальной лентой *4*, проходящей по роликам *5*, с рычагом *6* клапана *7*, регулирующего поступление воды в паровой котел. Клапан *7* также имеет не проходной, а поворотный сальник, обладающий меньшим трением.

Регулятор уровня завода РОСАТ. Изображенный на рис. 334 регулятор уровня завода РОСАТ состоит из поплавкового измерителя уровня, описанного выше (стр. 72), на оси которого кроме указывающей стрелки закреплен рычаг *1* с про-

тивовесом, соединяющийся тягой *2* с рычагом питательного двухседельного клапана *3*.

Действие регулятора понятно из рисунка и в дальнейших пояснениях не нуждается.

Регулятор давления Саваля. Одним из немногих представителей поплавковых регуляторов давления является регулятор Саваля, применяющийся для регулировки давления в перегонных и ректификационных аппаратах. Регулятор Саваля (рис. 335) представляет собой жидкостной поплавковый манометр, поплавок которого непосредственно управляет паровым вентилем, регулирующим поток греющего аппарат пара. Регулятор состоит из двух цилиндрических сосудов *1* и *2*, соединенных трубой *3*. Нижний сосуд *1* наполнен водой и соединен трубой *4* с паровым пространством аппарата. В верхнем сосуде *2* помещен поплавок *5*. Поплавок надет центральным каналом на патрубок *6* и несет тягу *7*, проходящую внутри патрубка *6*. Тяга *7* шарнирно соединена с рычагом *8*, имеющим неподвижную точку опоры *9*. К рычагу *8* шарниром *10* прикреплена тяга *11*, соединяющая рычаг *8* с рычагом *12*, закрепленным на шпинделе регулирующего клапана *13*. На рычаге *12* укреплен контргруз *14*, уравновешивающий систему рычагов и тяг.

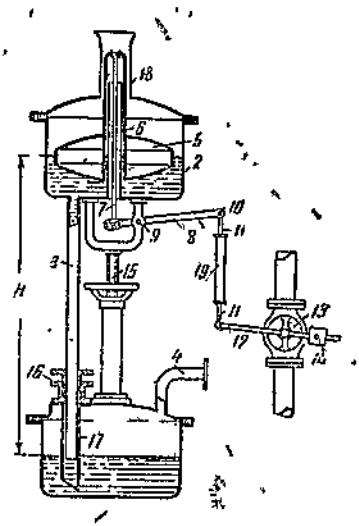


Рис. 335. Регулятор давления Саваля:

1 и *2* — сосуды; *3* — соединительная труба; *4* — труба для подачи давления; *5* — поплавок; *6* — патрубок; *7* — тяга; *8* — рычаг; *9* — ось вращения рычага; *10* — шарнир; *11* — тяга; *12* — рычаг клапана; *13* — регулирующий клапан; *14* — контргруз; *15* — винтовая стойка; *16* — сальник; *17* — телескопическая труба; *18* — патрубок для сообщения с атмосферой; *19* — римская гайка.

Действие регулятора заключается в следующем. Давление пара в аппарате заставляет воду из сосуда *1* подняться по трубе *3* в сосуд *2*. Столб воды, ограниченный уровнями в верхнем и нижнем сосуде, будет соответствовать давлению в аппарате. При изменении давления уровень воды в верхнем сосуде будет понижаться или повышаться, увлекая за собой поплавок *5*.

Перемещение поплавка вызовет соответствующую перестановку регулирующего клапана *13*.

Регулятор рассчитан на регулирование давления до 2000 *мм* вод. ст. Настройка регулятора на заданное давление осуществляется изменением расстояния между сосудами *1* и *2*. Сосуды *1* и *2* связаны винтовой стойкой *15*, позволяющей уменьшать или увеличивать расстояние между сосудами *1* и *2*, изменяя тем самым действующий столб жидкости. Дополнительная настройка

выполняется изменением длины тяги *11* при помощи римской гайки *19*.

Трубка *3* проходит в нижний сосуд сквозь сальник *16*, обеспечивающий герметичность сосуда *1*, и движется телескопически внутри трубы *17*, приваренной к крышке сосуда *1*.

Верхний сосуд патрубком *18* сообщается с атмосферой. Регулятор весьма чувствителен, реагируя на изменение давления порядка 50 *мм* вод. ст.

70. Колокольные регуляторы

Колокольные регуляторы применяются для регулирования давления и состоят из колокола, погруженного в запирающую жидкость. Пространство под колоколом сообщено с регулируемым давлением, изменение которого вызывает перемещение колокола. Колокол соединен с регулирующим органом, дросселирующим поток газа или пара, давление которого подлежит регулированию.

Колокольные регуляторы применяются в основном для регулирования газовых потоков при небольших давлениях газа. В редких случаях колокольные регуляторы строятся для давлений до 3 *кг/см*^{2}.

В качестве запорной жидкости применяется вода, раствор глицерина, масло; для повышенных давлений — ртуть.

Регулятор давления с уравновешенной заслонкой. Регулятор давления (рис. 336) состоит из колокола *2*, погруженного в сосуд *1*, заполненный водой. Пространство под колоколом соединено с трубопроводом за заслонкой, где необходимо поддерживать постоянное давление газа. Колокол подвешен на цепи или металлическом канатике *4*, охватывающем шкив *5*, сидящий на оси заслонки. К другому концу цепи подвешен уравновешивающий груз *3*.

Регулятор пригоден для трубопроводов диаметром от 150 до 2500 *мм*, допустимое начальное давление до 1000 *мм*, регулируемое до 100 *мм* вод. ст.

Желаемая величина давления после регулятора устанавливается изменением контргруза; точность регулирования при отсутствии резких колебаний в трубопроводе до 1 *мм* вод. ст.

Увеличением диаметра колокола можно достичь любой степени чувствительности.

Схема колокольного регулятора для регулирования тяги в кирпичном канале с заслонкой типа жалюзи представлена на рис. 337.

Регулятор состоит из колокола *2*, помещенного в заполненном жидкостью сосуде *3* и соединенного рычажной системой *5—6—7* с жалюзиобразной заслонкой *1*. Пространство под колоколом сообщается трубой *4* с каналом, давление в котором подлежит регулированию.

Колокольный регулятор с двухседельным клапаном. Другой тип колокольного регулятора представлен на рис. 338. Этот регулятор также рассчитан на регулируемое давление в 100 *мм* вод.

ст. Большой собственный вес колокола в данном регуляторе уменьшается кольцеобразным поплавком *A*, прикрепленным к нижнему краю колокола. Точная регулировка на заданное давление осуществляется накладыванием добавочных грузов *G*.

Колокол непосредственно жесткой тягой соединен с двухседельным клапаном параболической характеристики, обеспечивающей пропорциональность между ходом клапана и величиной площади прохода для газа.

Колокольный регулятор давления пара с ртутным заполнением. Этот регулятор (рис. 339) предназначен для регулирования давления до 3 *кг/см*². Регулятор состоит из трубчатого корпуса *1*, внутри которого помещен высокий колокол *2*, плавающий в кольцеобразном пространстве, заполненном ртутью. Колокол тягой *3* связан с рычагом *4*. Рычаг одним концом закреплен на шпинделе регулирующего клапана *5*, к другому концу рычага подвешен контргруз *6*,

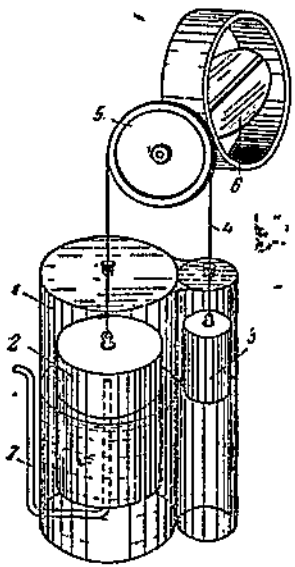


Рис. 336. Колокольный регулятор давления с заслонкой:

1 — сосуд колокола; *2* — колокол; *3* — противовес; *4* — трос; *5* — шкив; *6* — уравновешенная заслонка; *7* — труба для подачи давления.

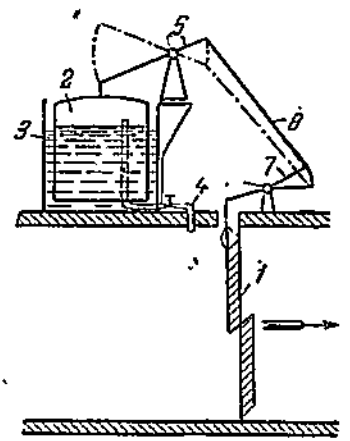


Рис. 337. Колокольный регулятор тяги:

1 — жалюзиобразная заслонка; *2* — колокол; *3* — сосуд колокола; *4* — труба для подвода давления; *5*, *6*, *7* — рычажная передача.

величиной которого устанавливается желаемое значение регулируемого давления.

Перемещение клапана в осевом направлении осуществляется вращением его шпинделя, снабженного четырехниточной резьбой.

Такая система передачи почти полностью устраняет воздействие на колокол давления пара на клапан. Это повышает чувствительность регулятора, достигающую в данном случае величины 0,05 *кг/см*².

71. Мембранные регуляторы

Наиболее многочисленной группой регуляторов прямого действия является группа мембранных регуляторов для регулирования давления, вакуума и температуры.

Регуляторы давления и вакуума однотипны, различаются лишь диаметром мембраны.

Мембранные регуляторы прямого действия могут работать при значительно бо́льших перепадах давлений, чем колокольные, и применяться для высоких производительностей, когда колокола получаются слишком громоздкими.

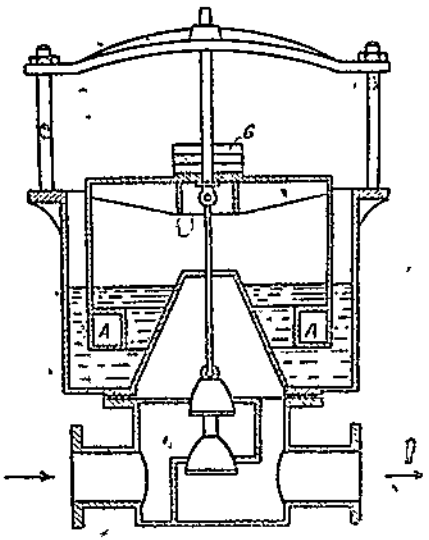


Рис. 338. Колокольный регулятор с двухседельным клапаном:

A — поплавок; *G* — добавочные грузы.

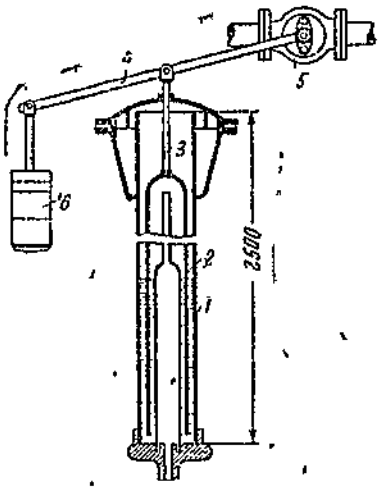


Рис. 339. Колокольный ртутный регулятор давления:

1 — корпус; *2* — колокол; *3* — тяга; *4* — рычаг; *5* — регулирующий клапан; *6* — контргруз.

На рис. 340 представлен мембранный регулятор с двухседельным клапаном, действие которого понятно из рисунка.

Различают регуляторы «до себя», когда регулируется величина давления перед регулятором, и «после себя», когда регулируется давление после регулятора. Регуляторы «до себя» при повышении давления увеличивают открытие клапана, а регуляторы «после себя» уменьшают открытие клапана при повышении давления.

Конструкция регулятора обычно позволяет перестановку клапанов, что делает возможным использовать регулятор в любом из этих вариантов.

На рис. 341 изображен мембранный регулятор прямого действия с разгруженным односедельным клапаном типа «после себя». Разгрузка клапана осуществляется дополнительной мембраной *а*. На мембрану *а* действует снизу давление до регулятора, а сверху давление после регулятора. Результирующая сила мембраны *а* направлена вверх и при соответственном подборе диаметра мембраны может полностью разгрузить клапан. Введение мембраны *а* в конструкцию регулятора исключает сальник для прохода штока клапана, что повышает чувствительность системы.

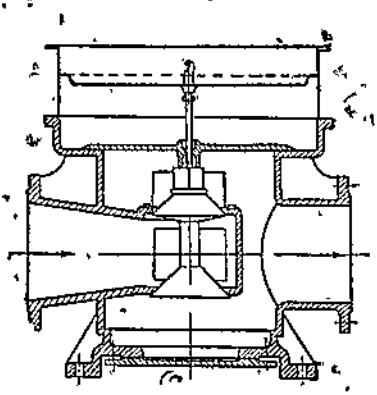


Рис. 340. Мембранный регулятор с двухседельным клапаном.

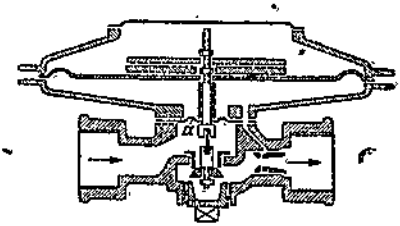


Рис. 341. Мембранный регулятор с односедельным разгруженным клапаном: *а* — дополнительная разгружающая мембрана.

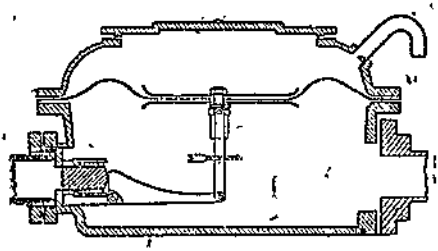


Рис. 342. Мембранный регулятор Пинча с рычажной передачей.

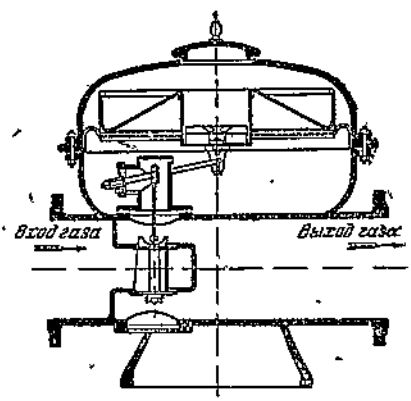


Рис. 343. Мембранный регулятор Бамаг.

Для более высоких давлений между мембраной и клапаном иногда вводится рычажная передача, как это показано на рис. 342, изображающем мембранный регулятор высокого давления фирмы Пинч; на рис. 343 приведен газовый

мембранный регулятор Бамаг. В этом регуляторе нагрузка мембраны пружиной заменена грузами, накладываемыми на мембрану.

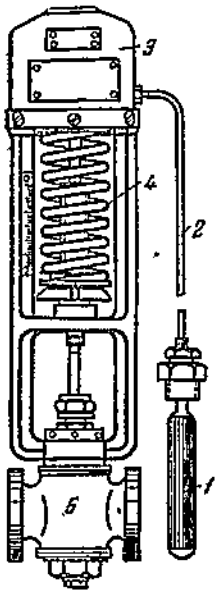


Рис. 344. Мембранный терморегулятор прямого действия:
1 — термопатрон; *2* — капиллярная трубка; *3* — сильфонная мембрана; *4* — пружина; *5* — регулирующий клапан.

Мембранный регулятор температуры прямого действия (рис. 344) основан на изменении упругости пара термометрической жидкости.

Регулятор состоит из термопатрона *1*, соединенного капиллярной гибкой трубкой *2* с сильфонной мембраной *3*, помещающейся в головке прибора.

Мембрана нагружена пружиной *4*, изменяя натяжение которой можно настраивать регулятор на различные желаемые температуры. Мембрана непосредственно соединена со штоком регулирующего клапана *5*, так что прогиб мембраны при изменении температуры переставляет регулирующий клапан.

Терморегуляторы прямого действия в исполнении завода «Теплоприбор» строятся для трубопроводов диаметром от $^3/_4$ до 4". Диапазон регулирования, в пределах которого может быть настроен регулятор натяжением пружины, составляет 25°.

Погрешность регулирования от $\pm$ 2 до $\pm$ 6%, причем величина погрешности возрастает с увеличением диаметра клапана и давления регулируемого агента.

Терморегулятор работает двухпозиционным циклом: «открыто» — «закрыто», почему пригоден для систем с большой тепловой инерцией.

ГЛАВА XVIII

РЕГУЛЯТОРЫ НЕПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

72. Регуляторы уровня

Регуляторы непрямого действия, или регуляторы с посторонним источником энергии, составляют главную массу регуляторов, применяемых в технологических процессах.

Независимость этой группы регуляторов от силы измерительного импульса позволяет создавать регулировочные устройства для регулирования любых параметров процесса, поддающихся измерению.

Регуляторы этой группы удобнее классифицировать и рассматривать по признаку их назначения, т. е. по виду регулируемого параметра или показателя регулирования.

Исходя из этого, в дальнейшем регуляторы непрямого действия рассматриваются в такой последовательности: регуляторы уровня, регуляторы давления и расхода, регуляторы температуры и специальные регуляторы (уд. веса, кислотности, цветности и прозрачности, состава и т. п.).

В пределах каждой группы регуляторы делятся по конструктивным признакам на гидравлические, электрические и смешанные (электрогидравлические).

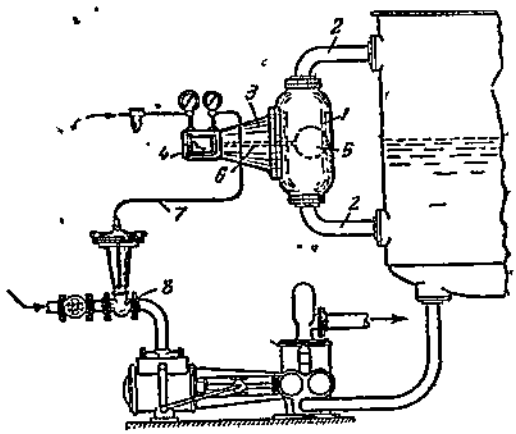


Рис. 345. Регулятор уровня с реле Арка:

1 — корпус; *2* — соединительные трубы; *3* — конусная надставка; *4* — реле; *5* — поплавок; *6* — рычаг поплавка; *7* — регулирующая линия; *8* — регулирующий клапан.

Поплавковый регулятор уровня с пневматическим реле Арка изображен на рис. 345. Регулятор состоит из чугунного корпуса *1*, присоединяемого трубами *2* к аппарату, в котором должен поддерживаться постоянный уровень. К корпусу *1* на фланце прикрепляется чугунная конусная надставка *3*, на конце которой находится реле *4*. Внутри корпуса расположен шаровой

поплавок *5*, сидящий на рычаге *6*. Рычаг поплавка связан с реле. С изменением уровня жидкости поплавок, следующий за перемещением зеркала жидкости, открывает или прикрывает дроссель реле Арка, изменяя давление воздуха в линии *7* регулятора. Давление воздуха, действуя на мембранный исполнительный механизм регулирующего клапана *8*, переставляет клапан, уменьшая или увеличивая подачу жидкости в аппарат.

Поплавок регулятора может быть помещен непосредственно в аппарат, для чего чугунная конусная надставка регулятора присоединяется фланцем прямо к стенке аппарата, как изображено на рис. 346. Размер фланца соответствует 250 *мм* условного прохода.

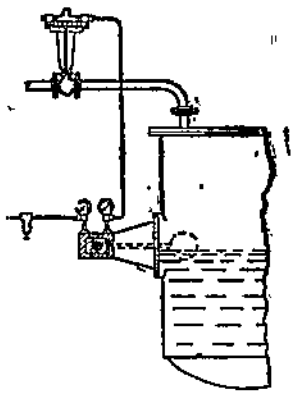


Рис. 346. Установка регулятора уровня на аппарате.

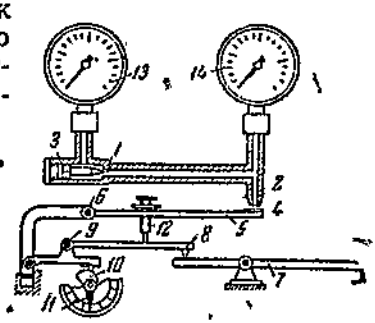


Рис. 347. Реле Арка регулятора уровня:

1 и *2* — дроссели; *3* — регулирующий винт; *4* — отбойная пластинка; *5* — рычаг отбойной пластинки; *6* — ось вращения рычага *5*; *7* — рычаг поплавка; *8* — передаточный рычаг; *9* — ось рычага *8*; *10* — эксцентрик; *11* — указатель; *12* — установочный винт; *13* и *14* — манометры.

Реле регулятора уровня (рис. 347) состоит из двойного дросселя *1* и *2*, из которых дроссель *1* регулируется винтом *3*, а дроссель *2* — отбойной пластинкой *4*, прикрепленной на рычаге *5*, вращающемся вокруг неподвижной оси *6*. Рычаг *5* передвигается рычагом *7* поплавка через вспомогательный рычаг *8*, ось вращения которого *9* может переставляться эксцентриком *10*, снабженным указателем *11*. Перестановка оси *9* изменяет пределы регулирования.

Рычаг *8* действует на рычаг *5* отбойной пластинки через установочный винт *12*, служащий для настройки регулятора. Реле снабжено манометрами *13* и *14* для контроля первоначального давления воздуха и давления воздуха в линии регулятора.

Регулятор строится для диаметров трубопроводов от 15 до 150 *мм*.

Регулятор уровня с электрическим управлением. На рис. 348 представлена схема регулятора уровня с электрическим управлением, установленного на абсорбционной ко-

лонне. Измерительным прибором положения уровня служит ртутный диференциальный манометр *1* с индукционным передатчиком. Вторичный прибор *2* контактного типа с регистрацией показаний передает командные импульсы одномоторному балансирному исполнительному механизму *3*, действующему на регулирующий клапан *4*. Регулятор позволяет поддерживать постоянство уровня в очень узких пределах. Другим преимуществом данного регулятора является возможность удаления на любое расстояние вторичного прибора.

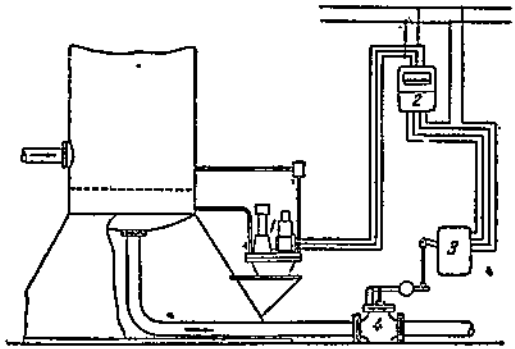


Рис. 348. Регулятор уровня с электрическим управлением:

1 — ртутный диференциальный манометр; *2* — вторичный прибор; *3* — одномоторный балансирный исполнительный механизм; *4* — регулирующий клапан.

73. Регуляторы давления, количества материалов и их расхода

Регуляторы давления, количества материалов и соотношения расходов по устройству аналогичны, так как измерение количества материалов дроссельными приборами сводится к измерению давления.

Регуляторы с реле Аскания. Наиболее часто применяются регуляторы давления и количества материалов со струйными реле Аскания в которых измерительным устройством служит мембрана, действующая на струйную трубку.

Рис. 349 схематически изображает регулятор давления завода КИП Главкокса. Регулятор состоит из измерительной мембраны, объединенной со струйным реле и масляным насосом в один агрегат *1*, исполнительного кривошипного механизма *2* и регулирующей заслонки *3*.

Отклонение давления от установленной величины, переданное по соединительной трубке *6*, вызовет прогиб кожаной мембраны и перестановку струйной трубки реле на одну из командных линий *4* или *5*. Давление жидкости в одной из линий передвинет поршень исполнительного механизма и повернет регулирующую заслонку в сторону открытия или закрытия.

Регуляторы давления строятся заводом КИП нескольких типоразмеров, из которых каждый охватывает определенный диапазон давления или разрежения.

Перестановочное усилие исполнительного механизма, при давлении масла 4 *кг/см*^{2}, равно 200 *кг*, что дает на кривошипе вращающий момент 18—20 *кг · м*.

Точность регулирования в пределах от ± 2 до $\pm 5\%$ максимального значения давления.

Быстрота регулирования около 20 сек.

Рис. 350 изображает регулятор расхода, поддерживающий неизменным количество вещества, протекающего в трубопроводе.

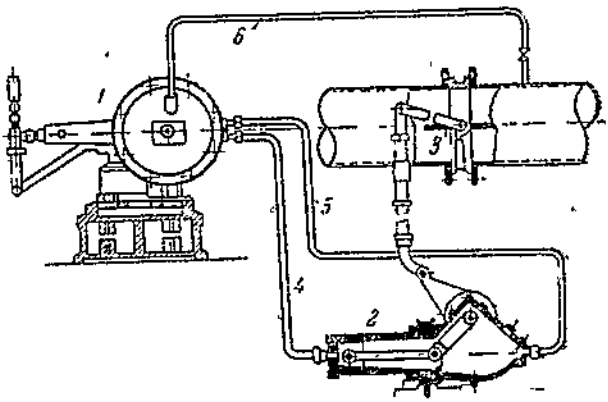


Рис. 349. Регулятор давления с реле Аскания:
1 — струйный регулятор Аскания; *2* — кривошипный исполнительный механизм; *3* — регулирующая заслонка; *4* и *5* — командные трубопроводы; *6* — трубка для подачи давления.

Как видно из рис. 350, устройство регулятора одинаково с регулятором давления и отличается лишь двухсторонним подводом

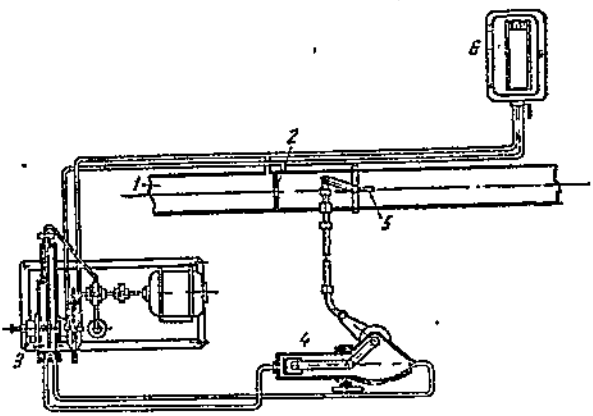


Рис. 350. Регулятор расхода с реле Аскания:
1 — трубопровод; *2* — острая диафрагма; *3* — струйный регулятор; *4* — кривошипный исполнительный механизм; *5* — регулирующая заслонка; *6* — расходомер (кольцевые весы).

давления к измерительной мембране от дроссельного прибора *2* (острой диафрагмы), установленного на трубопроводе *1*.

Прогиб диафрагмы, а следовательно, перестановка струйной трубки в этом случае будет вызываться отклонением от задан-

ного значения перепада давления или, иными словами, от изменения расхода в трубопроводе.

Регуляторы расхода строятся пяти типо-размеров на перепады давления 10—75; 50—300 и 100—500 *мм* вод. ст.

Остальные свойства одинаковы с регуляторами давления.

Регулятор соотношения расходов двух потоков изображен схематически на рис. 351. Устройство его в исполнительной части остается тождественным с регуляторами давления и расхода, измерительная же часть состоит из двух мембран, из

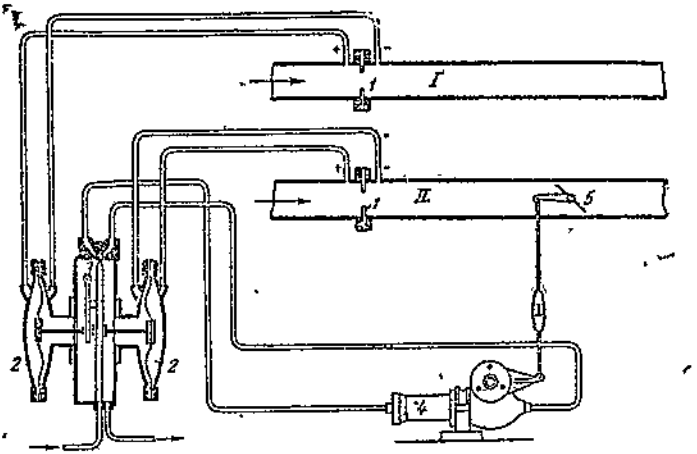


Рис. 351. Регулятор соотношения расходов двух потоков с реле Аскания:

I и *II* — регулируемые трубопроводы; *1* — измерительные диафрагмы; *2* — измерительные мембраны; *3* — реле Аскания; *4* — кривошипный поршневой исполнительный механизм; *5* — регулирующая заслонка.

которых одна измеряет перепад давления одного потока, а другая — второго потока. Обе мембраны действуют на струйную трубку в противоположных направлениях. Отверстия дроссельных диафрагм подбираются таким образом, чтобы, при заданном соотношении обоих потоков, перепады давлений обеих диафрагм были равны. Тогда усилия обеих измерительных мембран также будут равны и, взаимно уравновешиваясь, будут удерживать струйную трубку в среднем положении. Нарушение заданного соотношения расходов вызовет изменение перепадов на мембранах и результирующее усилие обеих мембран передвинет струйную трубку в одну или другую сторону, приведя этим в движение исполнительный механизм. Один из потоков выбирается основным и регулировке подвергается другой, изменяя расход которого в зависимости от колебаний расхода основного потока, поддерживают заданное соотношение обоих.

Регуляторы соотношения завода КИП Главкокса изготовляются на те же перепады давления, как и регуляторы расхода. Пределы регулирования 1,41—1,0—0,7 и 2,23—1,0—0,45.

Регуляторы с реле Арка. Другая группа регуляторов давления, расхода и соотношения использует дроссельное реле Арка.

На рис. 352 представлена схема регулятора давления фирмы Эккардта. Давление отбирается в точке *1* трубопровода (регулятор типа «после себя») и по трубке *2* подводится к мембранной капсуле *3*. Растяжение или сжатие капсулы *3* через систему рычагов *4—5* передвигает отбойную пластинку *6* дросселя *10*. Изменение давления в реле по трубе *11* передается мембране *13* регулирующего клапана *14*. Ось вращения *18* рычага *4* может перемещаться эксцентриком *17* для изменения пределов регулирования. Установочный винт *22* служит для настройки регулятора. Плоская пружина *6а*, действующая на рычаг *5*, создает противодействующую силу мембранной коробке *3*, обеспечивая однозначное положение отбойной пластинки для каждого значения регулируемого давления.

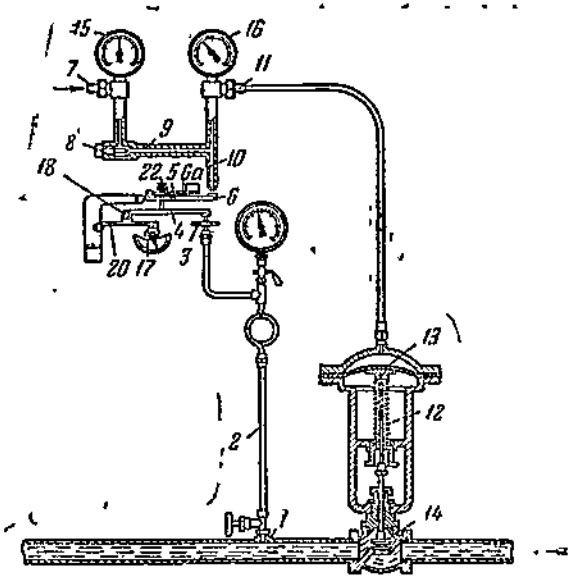


Рис. 352. Регулятор давления Эккардта с реле Арка:

1 — отбор давления; *2* — трубка подачи давления; *3* — мембранная капсула; *4—5* — рычажная передача; *6* — отбойная пластинка; *6а* — пружина; *7* — вход сжатого воздуха; *8* — дроссель; *9* — соединительная трубка; *10* — дроссель; *11* — командный трубопровод; *12* — пружина; *13* — мембрана исполнительного механизма; *14* — регулирующий клапан; *17* — эксцентрик; *18* — ось вращения рычага *4*; *22* — установочный винт.

Особую группу регуляторов с реле Арка представляют регуляторы, изготовляемые заводом «Тизприбор» по типу американских регуляторов Air—O—Line Фирмы Броун. Эти регуляторы могут применяться для регулирования давления, уровня, расхода, соотношения расходов, температуры и других параметров. Регулирующая часть приборов для регулирования любого из указанных параметров остается неизменной, меняется лишь воспринимающая часть регулятора.

В зависимости от условий и задач регулирования регуляторы изготовляются следующих разновидностей: 1) двухпозиционный регулятор типа «открыто» — «закрыто»; 2) трехпозиционный регулятор с узким диапазоном регулирования; 3) пропорциональный

регулятор с жесткой обратной связью и широким диапазоном регулирования; 4) изодромный регулятор с гибкой обратной связью.

Все указанные разновидности регуляторов снабжены первичным и вторичным дроссельным реле. Различие действия определяется устройством первичного реле регулятора.

Схема устройства простейшего регулятора давления приведена на рис. 353. Давление отбирается в точке *1* трубопровода за регулирующим органом и по трубке *2* передается манометрической пружине *3*. Последняя через систему рычагов *4*, *5* воздей-

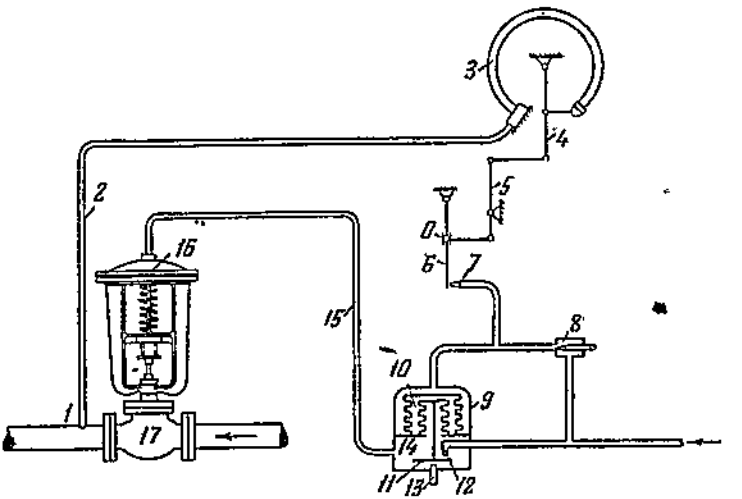


Рис. 353. Двухпозиционный регулятор давления:

1 — точка отбора давления; *2* — подающая трубка; *3* — манометрическая пружина; *4—5* — рычажная передача; *6* — заслонка; *7* — сопло первичного реле; *8* — постоянный дроссель; *9* — вторичное реле; *10* — мембранная коробка; *11* — дросселирующий диск; *12* — подающее сопло; *13* — выхлопное сопло; *14* — камера реле; *15* — командный трубопровод; *16* — мембранный исполнительный механизм; *17* — регулирующий клапан; *0* — точка присоединения тяги к заслонке *6*.

ствует на заслонку *6* сопла *7* первичного реле. Первичное реле состоит из постоянного дросселя *8* и сопла *7*. Изменение давления на участке между дросселем *8* и соплом *7*, зависящее от положения заслонки *6*, передается вторичному реле (усилителю) *9*.

Усилитель *9* состоит из мембранной коробки *10*, связанной штоком с диском *11*. Последний, перемещаясь сообразно сжатию или растяжению мембранной коробки *10*, изменяет соотношение отверстий сопла *12*, подающего сжатый воздух в камеру *14*, и сопла *13*, сообщающего камеру *14* с атмосферой. Изменение соотношений отверстий сопел *12* и *13* изменяет величину давления в камере *14* и в линии трубопровода *15*, соединяющего камеру *14* с мембранным исполнительным механизмом *16* регулирующего органа *17*.

Регулятор дает два положения регулирующего органа: полное открытие и полное закрытие, так как достаточно перемещения заслонки *6* на 0,05 *мм*, чтобы вызвать полную перестановку регулирующего органа.

Вторичное реле, введенное в систему регулятора, уменьшает влияние реактивной силы струи воздуха, выходящего из сопла *7*, на измерительную часть регулятора. Наличие вторичного реле позволяет уменьшить сечение сопла *7* до таких размеров, при которых сила струи воздуха, выходящего из сопла, не вызовет заметной погрешности измерительной части. Сечения сопел вторичного реле могут быть сделаны достаточно больших размеров для быстрого срабатывания исполнительного механизма. Вторичное реле рассчитано так, что изменение давления в коробке *9* вторичного реле на 0,1 *кг/см*^{2} вызывает изменение давления в камере *14* на 0,4 *кг/см*^{2}, т. е. достигается четырехкратное усиление.

Двухпозиционный регулятор применим к объектам с устойчивым режимом и большой инерцией, где точность регулирования не играет роли, а требуется лишь поддержание показателя регулирования в определенных пределах.

Этот вид регулятора превращается в трехпозиционный с узкой зоной дросселирования, введением в первичное реле приспособления, позволяющего перемещать точку *0* присоединения к заслонке *6* тяги от рычага *5*.

Перемещение точки *0* позволяет отрегулировать движение заслонки *6* так, чтобы ее полное перемещение, соответствующее крайним положениям регулирующего органа, совершалось в пределах зоны в 10% от возможного изменения показателя регулирования в объеме шкалы прибора. Работа регулятора протекает так же, как двухпозиционного, с тем лишь различием, что регулирующий клапан может занимать промежуточные положения между полным открытием и закрытием.

Для более плавной регулировки объектов с малой инерцией и быстрыми изменениями значения показателя регулирования применим пропорциональный регулятор с широкой зоной регулирования. Диапазон регулирования достигает у этих регуляторов 150%, т. е. при изменении значения показателя регулирования в пределах всей шкалы прибора регулирующий клапан передвинется на $^2/_3$ полного хода.

На рис. 354 представлена схема этого регулятора. Отличие его от двухпозиционного регулятора заключается в устройстве первичного реле, в конструкцию которого введен механизм обратной связи. Этот механизм состоит из коробки *19*, соединенной трубкой *18* с линией трубопровода *15*. В коробке помещена мембранная капсула *20*, жесткий шток *21* которой несет ось вращения *А* заслонки *6*. При повышении давления в трубопроводе манометрическая пружина *3* разогнется и отодвинет заслонку *6* от отверстия сопла *7*. Вследствие этого давление в камере *9* упадет, диск *11* переместится вверх, прикрывая сопло *12* и открывая отверстие *13*, давление в камере *14* и линии *15* упадет и пружина исполнительного механизма *16* начнет прикрывать регули-

рующий клапан *17*. Но одновременно понижение давления в трубке *15* передается в камеру *19*, мембранная коробка *20* начнет растягиваться и шарнир *A* подвеса заслонки *6* начнет перемещаться влево. Это вызовет приближение заслонки к отверстию сопла *7* и к приостановке перемещения регулирующего клапана.

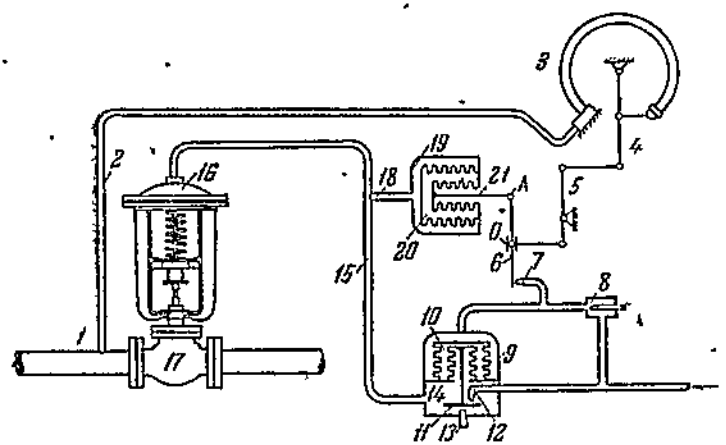


Рис. 354. Пропорциональный регулятор с широкой зоной регулирования:

3 — манометрическая пружина; *4* и *5* — рычажная передача; *6* — заслонка; *7* — сопло первичного реле; *9* — камера вторичного реле; *11* — дросселирующий диск; *12* и *13* — сопла вторичного реле; *14* — воздушная камера; *15* — командный трубопровод; *16* — исполнительный механизм; *17* — регулирующий клапан; *18* — соединительная трубка; *19* — коробка обратной связи; *20* — мембранная капсула; *21* — шток капсулы; *A* — ось вращения заслонки *6*.

Таким образом, в этом регуляторе каждому значению показателя регулирования будет соответствовать определенное положение регулирующего органа.

Точка *0* в этом регуляторе может перемещаться от руки, изменяя диапазон регулирования в пределах 10%, для настройки регулятора.

Изображенная на рис. 355 с х е м а представляет и з о д р о м н ы й р е г у л я т о р, имеющий степень неравномерности, близкой к нулю, т. е. поддерживающий постоянное заданное значение показателя регулирования при любых изменениях режима процесса. Это достигается введением в первичное реле гибкой обратной связи, состоящей из двух мембранных коробок *19* и *22*, содержащих двойные сильфонные капсулы *20* и *23*. Полости обеих капсул заполнены несжимаемой жидкостью (вазелиновое масло). Обе мембраны соединены жестким штоком *21*, несущим на себе ось *A* заслонки *6*. Полости мембран соединены каналом *24* с игольчатым дросселем *25*. Падение регулируемого давления, воздействуя на манометрическую пружину *3*, вызовет приближение

заслонки *6* к соплу *7*, что при помощи вторичного реле *9* увеличит давление воздуха в трубопроводе *15* исполнительного механизма. Повышение командного давления, действуя на мембраны *20*, сожмет их, вызвав перемещение штока *21* и точки вращения *А* заслонки *6* вправо, т. е. такой же результат, как у регулятора с жесткой обратной связью, описанного выше.

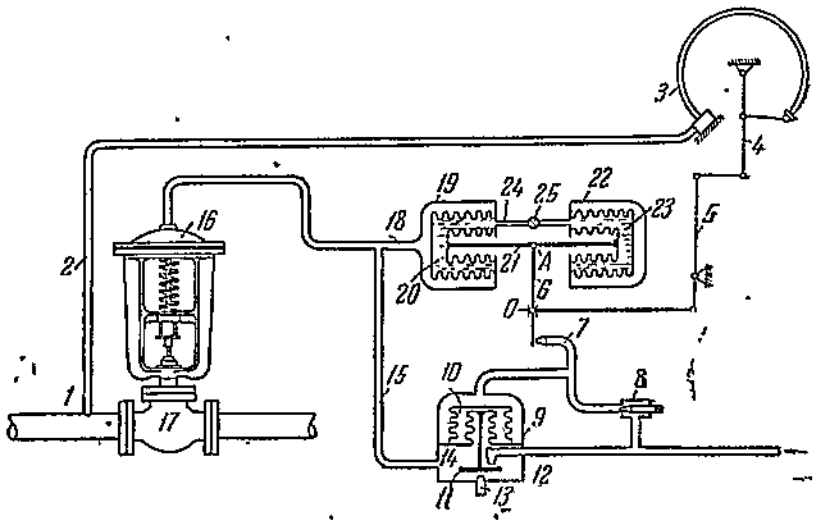


Рис. 355. Изодромный регулятор:

3 — манометрическая пружина; *4* и *5* — рычажная передача; *6* — заслонка; *7* — сопло первичного реле; *9* — вторичное реле; *15* — командный трубопровод; *19* и *22* — мембранные коробки; *20* и *23* — двойные мембранные капсулы; *21* — шток мембран; *24* — соединительный канал; *25* — игольчатый дроссель; *А* — ось вращения заслонки *6*.

Но далее жидкость, находящаяся в полости мембран *20*, начнет постепенно перетекать через дроссель *25* в полость мембран *23*. Давление в полостях обеих мембран будет постепенно выравниваться, а это вызовет смещение точки *А* влево и новое приближение заслонки к соплу *7*. Давление в командном трубопроводе и коробке *19* начнет снова возрастать, сдвигая точку *А* вправо. В конце концов перемещение механизма и точки *А* прекратится тогда, когда значение показателя регулирования максимально приблизится к заданному значению.

Конструктивно механизм регуляторов значительно сложнее, чем это представлено на схемах (рис. 355).

Для более точного представления об их устройстве ниже даются конструктивные схемы изодромного регулятора давления типа 0—4 завода «Гизприбор» и регулятор соотношения двух потоков.

Регуляторы завода «Гизприбор», как указано выше, применяются для регулирования давления, уровня, расхода и температуры. Воспринимающей частью при регули-

ровании давления и температуры служит геликоидальная манометрическая пружина, полость которой соединена с пространством, в котором регулируется давление, или с термометрической капсулой в случае регулирования температуры. Воспринимающей

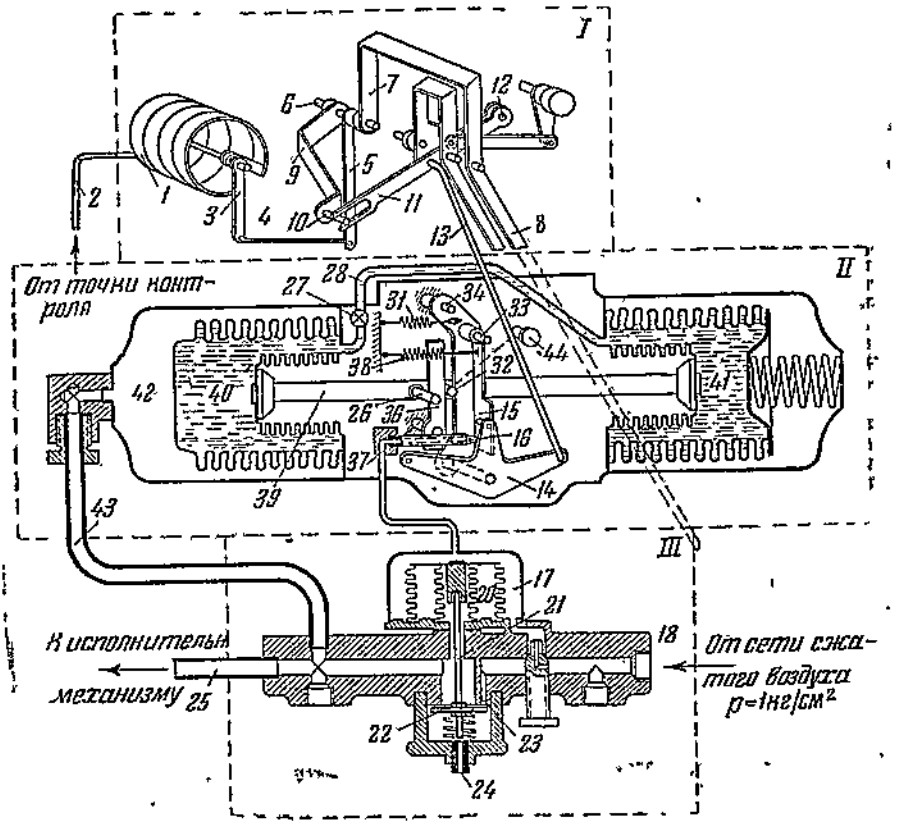


Рис. 356. Изодромный регулятор давления завода «Тизприбор»:

I — измерительно-координирующее устройство; *II* — первичное реле; *III* — вторичное реле; *1* — геликоидальная трубка; *2* — подводящая трубка; *3* — рычаг; *4* — тяга; *5* — рычаг; *6* — ось мостика; *7* — измерительный мостик; *8* — указательная стрелка; *9* — рычаг; *10* — палец рычага *9*; *11* — рычаг; *12* — ось рычага *11*; *13* — тяга; *14* — трехплечий рычаг; *15* — отбойная пластинка; *16* — сопло; *17* — камера вторичного реле; *18* — подача сжатого воздуха; *19* — дроссель вторичного реле; *20* — сильфонная коробка; *21* — шток сильфона; *22* — регулирующий диск; *23* и *24* — дроссели; *25* — командный трубопровод; *26* — палец; *27* — дроссельный вентиль; *28* — соединительный канал; *31* — пружина; *32* — ролик; *33* — рычаг; *34* — ось рычага; *36* — промежуточный рычаг; *37* — ось рычага; *38* — пружина; *39* — шток; *40* и *41* — сильфонные коробки; *42* — камера сильфона *40*; *43* — соединительная трубка.

частью регуляторов уровня и расхода служит поплавковый дифференциальный манометр.

Рис. 356 изображает конструктивную схему регулятора давления с гибкой обратной связью завода «Тизпри-

бор». Регулятор состоит из трех частей: измерительно-координирующего устройства *I*; первичного реле *II* и вторичного реле *III*.

Измерительная часть прибора выполнена в виде геликоидальной манометрической трубки *1*, сообщающейся трубкой *2* с трубопроводом или аппаратом, давление в котором подлежит регулированию. Изменение давления вызывает соответственную деформацию пружины *1* и поворот рычага *3*, соединенного с свободным концом пружины *1*. Поворот рычага *3* через тягу *4* и рычаг *5* передается оси *6* мостика *7* измерительной стрелки — пера *8*. Одновременно сидящий на оси *6* рычаг *9* будет поворачивать пальцем *10* рычаг *11* вокруг неподвижной оси *12*.

Отклонение рычага *11* вызовет перемещение тяги *13*, управляющей первичным реле. Тяга *13* поворачивает трехплечий рычаг *14*, который в свою очередь отклоняет отбойную пластинку *15*, изменяя проходное сечение сопла *16*. В результате изменения открытия сопла *16* изменяется давление в камере *17* вторичного реле. Изменение давления воздуха в камере *17* вызовет растяжение или сжатие двойной сильфонной коробки *20*, с которой штоком *21* соединен диск *22*. Перемещение диска *22* изменит открытие дросселей *23* и *24*, а следовательно, давление воздуха в трубке *25*, соединяющей вторичное реле с мембранным исполнительным механизмом регулирующего клапана.

Сжатый воздух поступает во вторичное реле по трубке *18* сети компрессора через фильтр и редукционный вентиль, понижающий давление общей сети до 1 *кг/см²*.

Первичное реле регулятора снабжено гибкой обратной связью, устройство и действие которой заключается в следующем. Отбойная пластинка *15*, нагруженная пружиной *38* и регулирующая отверстие сопла *16*, подвешена к рычагу *33*, имеющему точку опоры на оси *34*. Рычаг *33* пружиной *31* прижат через ролик *32* к рычагу *36*, вращающемуся вокруг неподвижной оси *37*. Рычаг *36* опирается на палец *26*, укрепленный на штоке *39*, соединяющем две сильфонные коробки *40* и *41*, наполненные жидкостью и сообщающиеся между собою каналом *28*, с дроссельным регулируемым вентилем *27*. Сильфонная коробка *40* помещена в камере *42*, соединенной трубкой *43* с командным трубопроводом *25* вторичного реле.

Допустим, что давление в трубопроводе увеличилось, тогда свободный конец рычага *3* переместится вправо, измерительная стрелка передвинется вверх от контрольной, тяга *13* и рычаг *14* отклонит отбойную пластинку от отверстия сопла *16*. Давление в камере *17* вторичного реле упадет и диск *20* переместится вверх, что повлечет за собой падение давления в трубопроводе *25*, и пружина начнет переставлять регулирующий клапан в положение закрытия. Одновременно упадет давление в камере *42*, что вызовет растяжение сильфонной коробки *40* и перемещение штока *39* влево. Палец *38* отойдет от рычага *36*, а это вызовет перемещение отбойной пластинки *15* к отверстию сопла *16*. При этом давление в камере *17* начнет возрастать; одновременно будет увеличиваться давление в командном трубопроводе *25*, замедляя

движение клапана. В результате вся система придет в равновесие при новом положении регулирующего клапана, соответствующем условиям режима. Скорость растяжения сильфона *40* определяется степенью открытия дроссельного вентиля *27*, что позволяет настроить регулятор в соответствии с условиями процесса. Для настройки диапазона регулирования служит ролик *32*, который можно передвигать вдоль рычагов *33* и *36* вращением винта

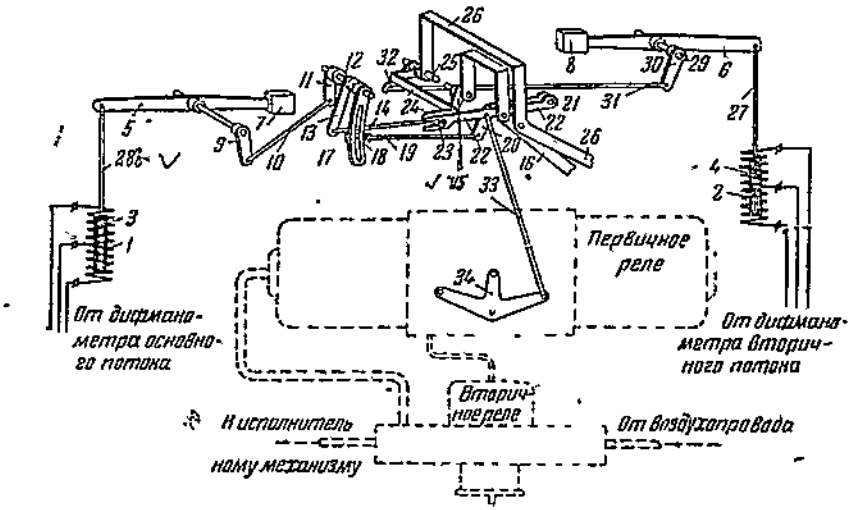


Рис. 357. Регулятор соотношения двух потоков завода «Тизприбор»:

1 и *2* — индукционные катушки; *3* и *4* — сердечники; *5* и *6* — коромысло; *7* и *8* — противовесы; *9* — кривошип; *10* — тяга; *11* — кривошип; *12* — ось пропорциональности; *13* — рычаг; *14* — тяга; *15* — рычаг стрелки; *16* — указательная стрелка; *17* — кулиса; *18* — передвижной шарнир; *19* — тяга; *20* — двухплечий рычаг; *21* — ось импульсного рычага; *22* — импульсный рычаг; *23* — палец; *24* — поводок; *25* — ось второго пера; *26* — второе перо; *27* и *28* — подвески сердечника; *29* — ось; *30* — кривошип; *31* — тяга; *32* — кривошип; *33* — тяга; *34* — трехплечий рычаг.

44. Перестановка ролика *32* изменяет соотношение плеч рычагов *33* и *36* и амплитуду перемещения отбойной пластинки обратной связью.

Регулятор пригоден для регулирования давлений в пределах 3—120 *кг/см*^{2}. Исполнительные механизмы изготовляются с клапанами диаметром ¾; 1 и 1½".

Полный ход клапанов 16 ± 0,2 *мм*.

Давление воздуха в сети 2—10 *кг/см*^{2}, перед регулятором 1 *кг/см*^{2}.

Регулятор соотношения расходов двух потоков с гибкой обратной связью завода «Тизприбор» имеет особое устройство измерительно-координирующей части регулятора. Релейное устройство однотипно с остальными регуляторами завода «Тизприбор» (рис. 357).

Назначение регулятора — выдерживать заданное соотношение потоков газа или жидкости в двух трубопроводах. Расход в одном из трубопроводов является независимым основным, расход же в другом трубопроводе (вторичном) регулируется в зависимости от изменения расхода в первом так, чтобы отношение количества вещества, протекающего во втором трубопроводе, к количеству в первом трубопроводе оставалось постоянным, равным заданному числу.

Измерительной частью регулятора являются дроссельные приборы, перепад давления в которых измеряется колокольными или поплавковыми диференциальными манометрами с индукционными передатчиками.

Вторичные катушки *1* и *2* индукционных передатчиков вмонтированы в корпус регулятора, и их сердечники *3* и *4* непосредственно связаны с координирующей и указывающей частями прибора.

Сердечники *3* и *4* подвешены к коромыслам *5* и *6* и уравновешены противовесами *7* и *8*.

Перемещение сердечника *3* вызывает поворот оси коромысла *5* вместе с сидящим на ней кривошипом *9*. Кривошип *9* тягой *10* и вторым кривошипом *11* передает вращение оси *12*, которая называется осью пропорциональности. На оси *12* жестко закреплен рычаг *13*, который тягой *14* и рычагом *15* поворачивает указательную и записывающую стрелку-перо *16*, отмечающую величину и колебания расхода в основном трубопроводе. На оси *12* укреплена также кулисса *17*, служащая для установки контрольного индекса. С кулиссой *17* передвижным шарниром *18* соединена тяга *19*, передающая движение кулиссы *17* двухплечему рычагу *20*, на другом конце которого укреплена ось *21* импульсного рычага *22*.

Импульсный рычаг *22* имеет на конце вилку, охватывающую палец *23*, сидящий на конце поводка *24*. Этот поводок связан с осью *25* второго пера *26*, регистрирующего расход во вторичном трубопроводе. Движение пера *26* осуществляется от сердечника *4* через тягу *27*, коромысло *6*, ось *29*, кривошип *30*, тягу *31* и кривошип *32*.

Если плечо кулиссы *17* от оси *12* до шарнира *18* будет равным плечу рычага *13*, то регулятор будет выдерживать углы поворота стрелок *16* и *26* равными друг другу, т. е. обе стрелки будут двигаться вместе, перекрывая одна другую. Для этого рычаги прибора установлены таким образом, чтобы центральная точка импульсного рычага *22*, в которой укреплена тяга *33* к трехплечему рычагу *34* первичного реле, лежала на геометрической оси поворота обеих стрелок при их совпадении.

Тогда всякий поворот одной из стрелок вызовет поворот рычага *22* вокруг одного из его концов. Так, поворот стрелки *26* вызовет поворот рычага *22* вокруг оси *21*, а поворот стрелки *16* повернет рычаг *22* вокруг пальца *23*. В том и другом случае тяга *33* приведет в действие первичное и вторичное реле и исполнительный механизм.

Процесс регулирования будет продолжаться до тех пор, пока изменение расхода во вторичном трубопроводе не вызовет передвижения стрелки *26* до совпадения со стрелкой *16*.

При вращении стрелок *16* и *26* одновременно и с одинаковой угловой скоростью тяга *33* останется неподвижной, так как рычаг *22* будет вращаться вокруг средней точки, т. е. вокруг шарнира тяги *33*.

Если плечо кулиссы *17* увеличить или уменьшить по сравнению с плечом рычага *13* перестановкой шарнира *18*, то регулятор будет выдерживать перемещение стрелки *26* в определенном угловом соотношении с перемещением стрелки *16*. Это получится вследствие того, что центральная точка рычага *22* будет лежать на геометрической оси стрелок *16* и *26* не в момент перекрытия обеих стрелок друг другом; а при определенном угле их расхождения.

Изменение величины соотношения потоков этим регулятором лежит в пределах 0,4—1,6. Предельные перепады для колокольных дифференциальных манометров с индукционными передатчиками 3—30 *мм* рт. ст., для поплавковых дифференциальных манометров 40,6—1020,9 *мм* рт. ст.

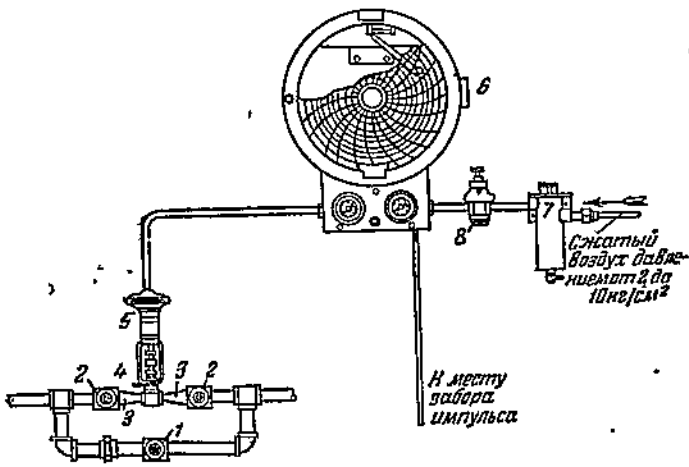


Рис. 358. Монтажная схема включения регулятора завода «Тизприбор»:
1 — вентиль на обходной линии; *2* — запорные вентили; *3* — переходные конусы; *4* — регулирующий орган; *5* — исполнительный механизм; *6* — регулятор; *7* — воздушный фильтр; *8* — регулятор сжатого воздуха.

Регуляторы «Тизприбор» заключены в круглый кожух и снабжены регистрирующим механизмом, записывающим колебания показателя регулирования на дисковой диафрагме. Регуляторы включаются в сеть сжатого воздуха с давлением 2—10 *кг/см²* через фильтр и регулятор давления, понижающий давление воздуха перед регулятором до 1 *кг/см²*. На рис. 358 изображена монтажная схема включения регулятора. На рисунке

обозначены: *7* — воздушный фильтр; *8* — регулятор давления сжатого воздуха; *6*—регулятор «Тизприбор»; *5*—исполнительный мембранный механизм; *4* — регулирующий орган; *3* — переходные конусы; *2* — запорные вентили; *1* — вентиль на обходной линии для выключения регулятора.

Колокольный регулятор для очень малых давлений. Для регулирования давления в обжиговых или плавильных печах можно применять колокольный регулятор с электрическими реле и исполнительным механизмом.

На рис. 359 изображена принципиальная схема регулятора, состоящего из измерительного колокола *1* с упругой подвеской, электронного реле *2* и моторного исполнительного механизма *3*.

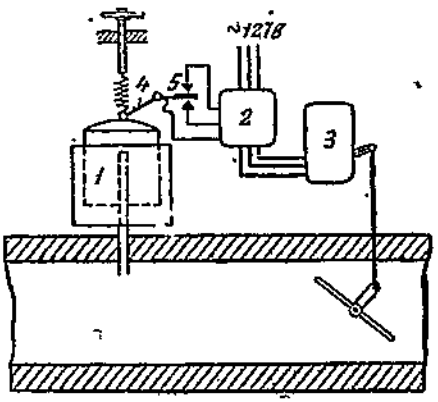


Рис. 359. Схема колокольного регулятора для очень малых давлений:

1 — измерительный колокол; *2* — электронное реле; *3* — моторный исполнительный механизм; *4* — рычаг; *5* — переключатель.

Измерительный колокол подвешен к пружине, верхний конец которой укреплен к винту, проходящему в гайке, снабженной маховичком. Вращением маховичка можно изменять натяжение пружины и пределы регулируемого давления. В нижней части подвески колокола шарнирно закреплен легкий рычаг *4*, переставляющий переключатель *5*, подающий импульсы электронному реле *2*. Использование электронного реле позволяет применить весьма маломощное контактное устройство в импульсном переключателе *5* и обеспечить его длительную работу.

Электронное реле (рис. 360) состоит из двух трехэлектродных ламп типа УО-104 *6* и *7*, анодные цепи которых и цепи накала питаются от трансформатора *8*. В анодные цепи включены высокоомные реле *9* и *10* с нормально замкнутыми контактами, которые управляют магнитными пускателями *11* и *12* реверсивного исполнительного мотора *13*. В цепь мотора параллельно включен магнитный тормоз *14*, затормаживающий ось мотора в момент его выключения для устранения перерегулирования от действия сил инерции вращающихся масс.

Работа регулятора протекает следующим образом. При отклонении давления от заданного значения замыкается один из контактов переключателя *5*, допустим верхний. Замыкание этого контакта подает смещающее напряжение на сетку лампы *6*. Это вызовет резкое мгновенное уменьшение тока в анодной цепи лампы *6* и высокоомное реле *9* отпустит ранее притянутый якорь. Контакты реле *9* замкнутся и сработает магнитный пускатель *11*. Мотор *13* начнет работать, прикрывая шибер дымовой трубы печи до тех пор, пока давление в печи не поднимется до нормы. При достижении нормального давления переключатель *5* разорвет цепь смещения, реле *9* притянет якорь, выключив свои контакты, катушка магнитного пускателя *11* обесточится и мотор *13* будет выключен.

При повышении давления сверх нормы, колокол замкнет нижний контакт переключателя *5*, смещающее напряжение будет подано на сетку лампы *7* и процесс регулирования будет протекать в обратном направлении.

Мотор *13* снабжен предельными выключателями, останавливающими его по достижении регулирующей заслонкой одного из крайних положений.

Для более плавного подведения к норме показателя регулирования и устранения явлений перерегулирования в цепь переключателя *5* включен ре-

гулятор циклов *15*, состоящий из моторчика Уоррена, на валу которого закреплен кулачный диск, периодически замыкающий и размыкающий цепь смещения.

Работа регулятора приобретает характер шагового регулирования, и отклонения показателя регулирования плавно приводятся к норме.

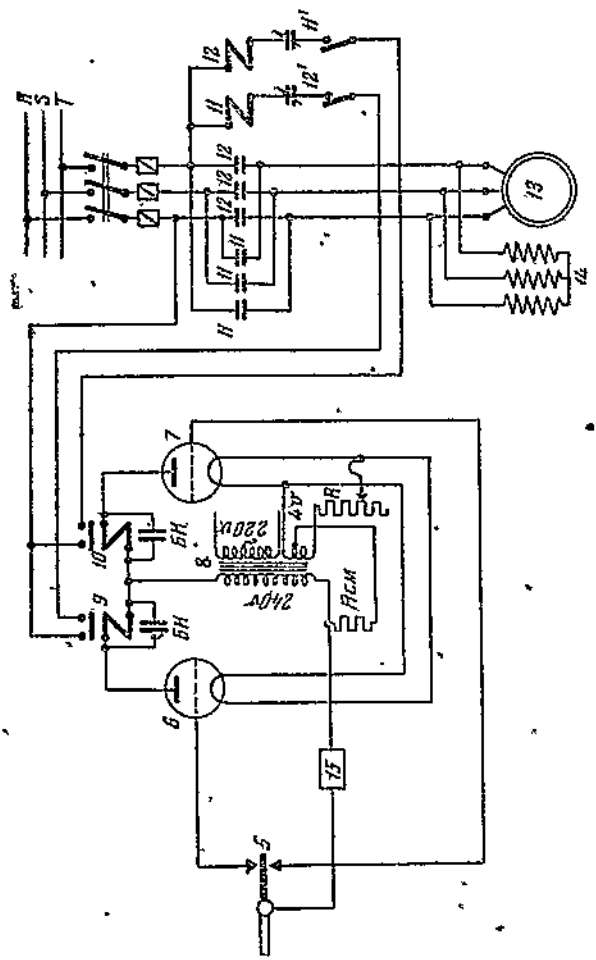


Рис. 360. Схема электронного реле колокольного регулятора для малых давлений:

5 — переключатель; *6* и *7* — трехэлектродные лампы; *8* — питающий трансформатор; *9* и *10* — высокоомные реле; *11* и *12* — магнитные пускатели; *13* — реверсивный мотор; *14* — магнитный тормоз; *15* — регулятор циклов.

Регулятор рассчитан на регулирование давления в пределах 1—3 *мм* вод. ст. Чувствительность регулятора 0,05—0,1 *мм* вод. ст. Для устранения запаздывания и погрешностей регулирования трубопровод, подводящий давление под колокол, необходимо делать возможно короче и большого диаметра порядка 40—50 *мм*.

В качестве рабочей жидкости применяется трансформаторное масло. Измерительная часть регулятора, находящаяся в непосредственном соседстве с печью, должна быть защищена от пыли герметическим кожухом. Электронное реле может быть удалено от измерительной части на любое расстояние и должно быть установлено в помещении, свободном от пыли и резких изменений температуры.

74. Регуляторы температуры

Регуляторы температуры образуют наиболее многообразную по устройству и принципам действия группу регуляторов.

Многообразие типов терморегуляторов объясняется как широким диапазоном регулируемых температур в химических производствах, так и чрезвычайным разнообразием устройства тепловых аппаратов и методов их обогрева.

В роли измерительных устройств терморегуляторов используются все виды измерителей температуры: биметаллические и манометрические термометры, термометры сопротивления, термопары и радиационные пирометры.

В качестве релейных устройств применяются, главным образом, гидравлические и электрические системы. В последнее время в терморегуляторах начинают широко использовать электронные реле и фотоэлементы.

Примененный тип реле, а также метод обогрева аппарата определяет тип исполнительного механизма регулятора. В дальнейшем будут описаны лишь главнейшие типы терморегуляторов, отличающихся принципами действия и особенностями устройства.

Терморегулятор типа Дирет с обратной связью. Регулятор температуры типа Дирет предназначен в основном для увлажнительных установок перегретого пара, где он регулирует подачу воды для поддерживания заданной температуры пара после увлажнения, и для регулирования температуры воды в деаэраторных установках. Кроме этих основных назначений терморегуляторы Дирет могут быть использованы для регулировки температуры различных теплообменных аппаратов с паровым или водяным нагревом.

Терморегулятор (рис. 361) состоит из измерительно-координирующего устройства *4*, поршневого исполнительного механизма *6*, дроссельного реле *5* и регулирующего органа *1*.

Измерительное устройство регулятора представляет собой трубчатый дилатометрический термометр (рис. 362). Внешняя трубка термометра *2* изготовлена из материала с большим коэфициентом линейного расширения (медь, алюминий), а внутренний стержень *1* из материала с малым коэфициентом линейного расширения (инвар, кварц, фарфор). Стержень *1* нагружен пружиной *18*, прижимающей его к нижнему закрытому концу трубки 2. При изменении длины трубки *2* от нагревания или охлаждения стержень *1*, длина которого практически не изменяется, будет следовать за перемещениями конца трубки *2*.

Верхний конец стержня *1* через толкатель *4* опирается в регулировочный винт *12* рычажка *11*. Рычажок подвешен на двух скользящих опорах *17* при помощи пружины *16*, под действием которой второй конец рычажка *11* стремится приблизиться к отверстию сопла *6*. На этом конце рычага укреплен колпачек *8* и отбойная пластинка *9*.

В головке прибора имеется перегородка *5*, препятствующая попаданию рабочей жидкости внутрь трубки термометра. Рабо-

чая жидкость подводится к соплу *6* через штуцер *7*; штуцер *10* служит для слива рабочей жидкости из головки прибора.

Таким образом, измерительная часть прибора непосредственно управляет вторым дросселем реле Арка.

Сопло соединяется трубкой *7* с верхней полостью цилиндра исполнительного механизма *6* (рис. 361). Рабочая жидкость (вода) поступает из напорного бака или водопроводной сети через регулятор давления *8* и фильтр *9* к первичному дросселю *5*, установленному на крышке цилиндра.

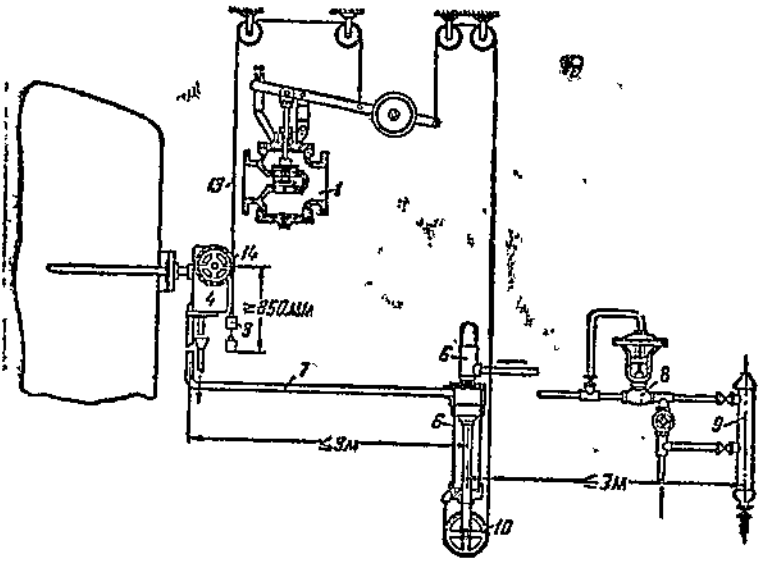


Рис. 361. Монтажная схема терморегулятора Дирет:

1 — регулирующий орган; *3* — противовес; *4* — измерительно-координирующее устройство; *5* — первичный дроссель; *6* — исполнительный механизм; *7* — соединительная труба; *8* — регулятор давления воздуха; *9* — воздушный фильтр; *10* — ролик поршня исполнительного механизма; *13* — стальной трос; *14* — шкив обратной связи.

Конструкция дросселя *5* показана на рис. 363. Пройдя игольчатый дроссель, вода поступает в цилиндр и оттуда по трубе *7* ко второму дросселю в головку измерительного устройства.

Нижний конец поршневого штока исполнительного механизма снабжен вилкой с желобчатым роликом *10* (рис. 361). Через ролик переброшен стальной канатик, закрепленный одним концом неподвижно к крышке цилиндра, а другим присоединенный к концу рычага регулирующего клапана *1*. Действие регулятора протекает следующим образом. При нормальной температуре рычажок *11* (рис. 362) измерительного устройства находится в среднем положении и выходное сечение дросселя *6* равно сечению

дросселя *5* (рис. 361), приток и отток жидкости в цилиндре равны между собой и поршень неподвижен. При повышении температуры трубка термометра удлиняется и внутренний стержень передвигается вглубь трубки. Натяжение пружины *16* заставляет рычажок *11* повернуться, отбойная пластинка *9* приблизится к отверстию сопла *6*, уменьшая выходное сечение. Давление в цилиндре исполнительного механизма повысится и поршень его начнет двигаться вниз, прикрывая регулирующий клапан.

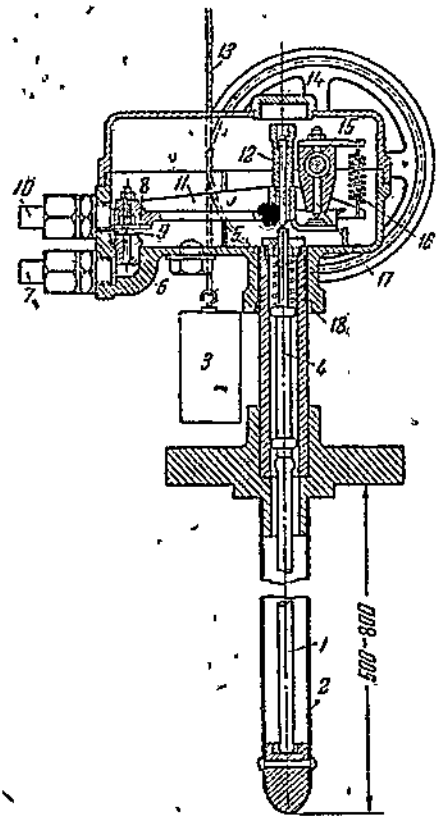


Рис. 362. Датчик терморегулятора Дирет:

1 — нерасширяющийся стержень; *2* — наружная трубка; *3* — противовес; *4* — толкатель; *5* — перегородка; *6* — сопло; *7* — штуцер для подачи жидкости; *8* — колпачок; *9* — отбойная пластинка; *10* — сливной штуцер; *11* — рычаг; *12* — регулировочный винт; *13* — трос; *14* — шкив; *15* — ось шкива; *16* — пружина; *17* — скользящая опора; *18* — нагрузочная пружина.

При уменьшении температуры процесс протекает в обратном направлении и груз, сидящий на рычаге регулирующего клапана, заставляет его открываться. Для более плавного течения процесса регулирования регулятор снабжен механической обратной связью, устроенной следующим образом. Перемещение рычага регулирующего клапана передается тросом *13* шкиву *14* измерительного устройства (рис. 361—362). Трос охватывает шкив на дуге 360° и натянут грузиком *3*. Ось *15* шкива *14* снабжена двумя коническими выточками и имеет на конце винтовую нарезку, при помощи которой при вращении шкива ось его *15* получает поступательное движение в аксиальном направлении. Перемещение рычага клапана при повышении температуры заставит ось *15*, поворачиваясь, перемещаться продольно и поверхности конических выточек начнут выдвигать опоры *17*, что вызовет поворот рычага *11* около точки касания его со штоком *4*. Отбойная пластинка будет при этом отодвигаться от отверстия сопла, вызывая падение давления в цилиндре исполнительного механизма и остановку перемещения регулирующего клапана. Регуляторы строятся

для регулирования температур в аппаратах с паровым обогревом в пределах 80—150° с точностью до ± 1%.

Давление греющего пара 1,2—7 *кг/см²*. Регулирующие клапаны выполняются на условные проходы 100, 200 и 250 *мм*. Напор рабочей жидкости (воды) 15—50 *м* вод. ст. Длина термопатрона регулятора 500—800 *мм*.

Манометрический терморегулятор с пневматическим реле Арка изображен схематически на рис. 364. Измерительная часть регулятора состоит из термопатрона *1*, установленного на аппарате, соединительного гибкого капилляра *2* и мембранной коробки *3*. Измерительная система заполнена жидкостью или газом, температурное расширение которых, преобразуясь в давление, заставляет перемещаться мембраны коробки *3*. Перемещение мембран через опирающийся на мембранную коробку рычаг *4* и опорный винт *22* передается рычагу *5*, несущему на своем конце отбойную пластину *6*, приближающуюся или удаляющуюся от отверстия *10*.

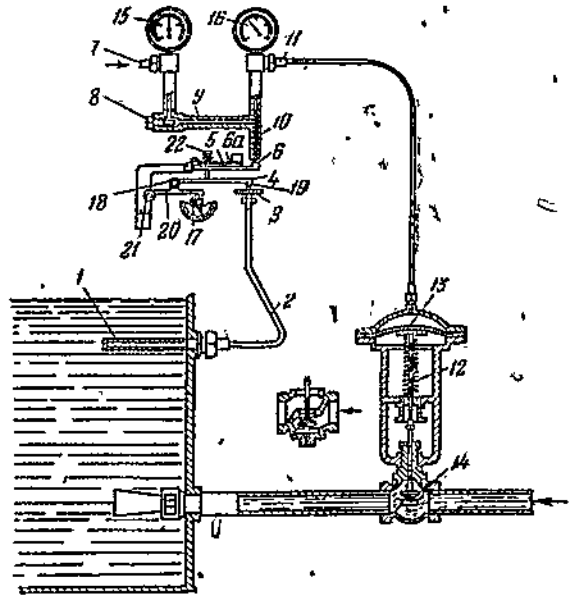


Рис. 364. Манометрический терморегулятор с реле Арка:

1 — термопатрон; *2* — соединительный капилляр; *3* — мембранная коробка; *4* — воспринимающий рычаг; *5* — передаточный рычаг; *6* — отбойная пластинка; *7* — подвод воздуха; *8* — игольчатый дроссель; *9* — соединительный канал; *10* — сопло; *11* — управляющий трубопровод; *12* — пружина исполнительного механизма; *13* — мембранный исполнительный механизм; *14* — регулирующий клапан; *15—16* — манометры; *17* — улитка; *18* — ось вращения рычага *4*; *20* — опорный рычаг; *21* — ось опорного рычага; *22* — опорный винт.

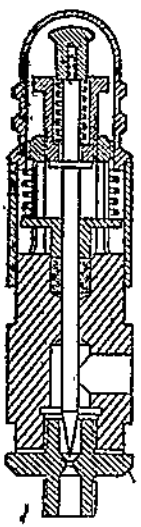


Рис. 363. Дроссель терморегулятора Дирет.

При падении температуры мембранная коробка сожмется и отбойная пластинка отойдет от отверстия сопла, открывая большее сечение для выхода воздуха. Воздух подводится к реле из общей сети через патрубок *7* с манометром *16*, указывающим начальное давление воздуха. Первое дросселирование выполняется игольчатым дросселем *8*, после которого по каналу *9* воздух подходит к соплу *10*, являющемуся вторым дросселем. Переменное рабочее давление воздуха измеряется манометром *16* и подается по трубке *11* к мембранному исполнительному механизму *13* регулирующего клапана *14*.

Открытие сопла *10* при понижении температуры вызывает падение давления воздуха в реле и исполнительном механизме и пружина *12* начнет переставлять клапан *14* в положение открытия. Изменение предела регулирования, т. е. настройка терморегулятора на определенную температуру, выполняется следующим приспособлением. Ось вращения *18* рычага *4* закреплена на рычажке *20*, имеющем неподвижную ось вращения *21*. Другой конец рычажка *20* опирается на улиткообразный диск *17*. Поворот диска *17* против часовой стрелки вызовет смещение оси *18* вниз и отход отражательной пластинки *6* от сопла *10*. Тем самым регулятор будет настроен на более высокую температуру. При вращении улитки *17* по часовой стрелке отражательная пластинка будет придвигаться к отверстию сопла и регулятор будет настраиваться на более низкую температуру.

Улитка *17* поворачивается ключом, причем указатель, сидящий на оси улитки, передвигается по шкале, позволяя установить желаемый предел регулирования.

Регулирующий клапан *14* позволяет перестановку в обратную сторону, как показано на рис. 364, сбоку около клапана. При такой перестановке клапан будет открываться с повышением давления в реле и закрываться при понижении, т. е. двигаться в обратном направлении по сравнению с обычным движением.

Подобные регуляторы строятся для одновременного регулирования двух факторов, что имеет место в том случае, например, когда аппарат обогревается паром двух давлений: вторичным паром и паром высокого давления. Основное регулирование обычно ведется паром низкого давления и только при его недостаче начинается регулирование паром высокого давления.

На рис. 365 изображена установка подобного регулятора для регулирования температуры в аппарате, обогреваемом паром двух давлений.

Реле этого регулятора построено аналогично описанному выше, но в нем добавлено еще одно сопло и отбойная пластинка. Оба сопла управляются одной мембранной коробкой, но одно сопло закрывается раньше и открывается позже другого. Поэтому при понижении температуры сперва будет открываться сопло, связанное с клапаном пара низкого давления, и лишь после полного открытия этого сопла, а следовательно, и регулирующего клапана низкого давления начнет открываться сопло, управляющее клапаном высокого давления. При повышении температуры сперва закроется клапан высокого давления и после его закрытия начнет прикрываться клапан низкого давления.

Терморегуляторы завода «Тизприбор» представляют собою манометрические термометры с геликоидальной пружиной, соединенные с пневматическим реле и мембранными исполнительными

механизмами. Терморегуляторы строятся всех четырех типов. Конструкция и действие регуляторов тождественны с регуляторами расхода, описанными в разделе 73.

Электрические терморегуляторы могут работать от термопар и термометров сопротивления в сочетании с электрическими, пневматическими, электронными и фотоэлектрическими реле.

Количество типов и электрических схем электрических терморегуляторов чрезвычайно велико. Поэтому в дальнейшем будут приведены лишь основные типы, отличающиеся принципами действия.

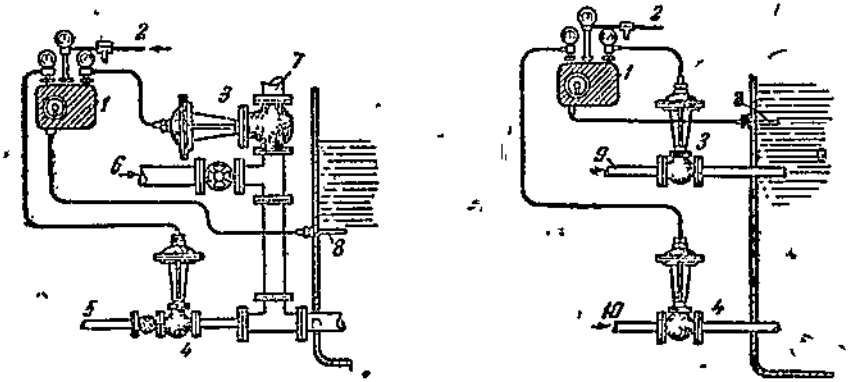


Рис. 365. Манометрический терморегулятор двух потоков с реле Арка:
1 — регулятор; *2* — вход сжатого воздуха; *3* и *4* — регулирующие вентили; *5* — вход свежего пара; *6* — вход отработанного пара; *7* — выхлопная труба; *8* — баллон термометра; *9*—вход теплоносителя; *10*—вход охлаждающего агента.

Терморегуляторы ВОТИ. Терморегуляторы ВОТИ состоят из измерительно-координирующей части, в состав которой входит термопара и контактный гальванометр, реверсирующего реле времени и моторного исполнительного механизма, в качестве которого может быть применен двухмоторный или одномоторный балансирный механизм.

Электрическая схема регулятора с двухмоторным балансирным исполнительным механизмом изображена на рис. 366.

Работа регулятора с трехпозиционным гальванометром протекает в следующем порядке. Допустим, что гальванометр показал температуру ниже заданной. Падение дужки гальванометра замкнет контакт K_3. При замыкании контакта K_3 будут включены катушки XP_3-$П$ и R_3. Названные реле притянут свои якоря, замкнув контакты KR_3 и нижний контакт стоп-реле. Контакт K_3 включит мотор начального хода, если он не был выключен перед этим предельным выключателем $L_н$.

Вслед за этим гальванометр замкнет блокировочный контакт K_1, возбуждающий левые катушки стоп-реле и катушку R_1

реверсивного реле. Последняя замкнет контакт KR_1 и пустит в ход мотор Уоррена реле.

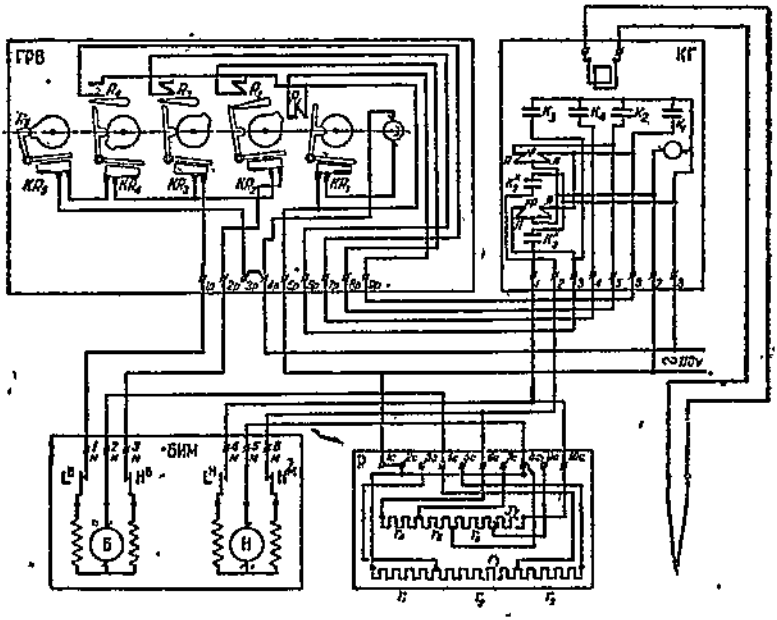


Рис. 366. Терморегулятор ВОТИ с двухмоторным исполнительным механизмом:

K_1 — блокировочный контакт; K_2 — контакт высокой температуры; K_3 — контакт низкой температуры; K_4 — контакт нормальной температуры; R_1, R_2, R_3, R_4 — катушки реверсивного реле времени; *БИМ* — балансирный исполнительный механизм; R — регулирующий реостат.

При повороте дисков реле на 15° (рис. 367) якорь реле R_5, освобожденный кулачком пятого диска, повернется, замкнув контакт KR_5. Якорь реле R_1 не сможет вернуться в начальное положение, несмотря на обесточивание катушки R_1, так как выемка первого диска сместится и выступ якоря упрется в поверхность диска. При дальнейшем повороте приблизительно на угол 45° четвертый диск отожмет кулачком якорь реле R_4, замкнув контакт KR_4, включив тем самым балансирный мотор.

К моменту поворота оси реле и дисков на угол около 30° гальванометр разомкнет контакты K_3 и K_1, вследствие чего якори реле R_3 и R_4 отпадут.

Продолжающееся вращение оси и дисков реле вызовет, при повороте примерно на 135°, отжатие кулачком третьего диска якоря реле R_3; контакт KR_3 разомкнется и балансирный мотор будет выключен. При повороте системы дисков реле на полный оборот, т. е. на 360°, система реле придет в исходное положение, т. е. контакты реле R_1, R_2, R_3 и R_5 выключены, мотор Уоррена остановлен.

Реостаты r_1—r_7 служат для регулировки скоростей моторов исполнительного механизма. Реостаты r_1—r_3 регулируют балансирный мотор, а реостаты r_4—r_7 — мотор начального хода.

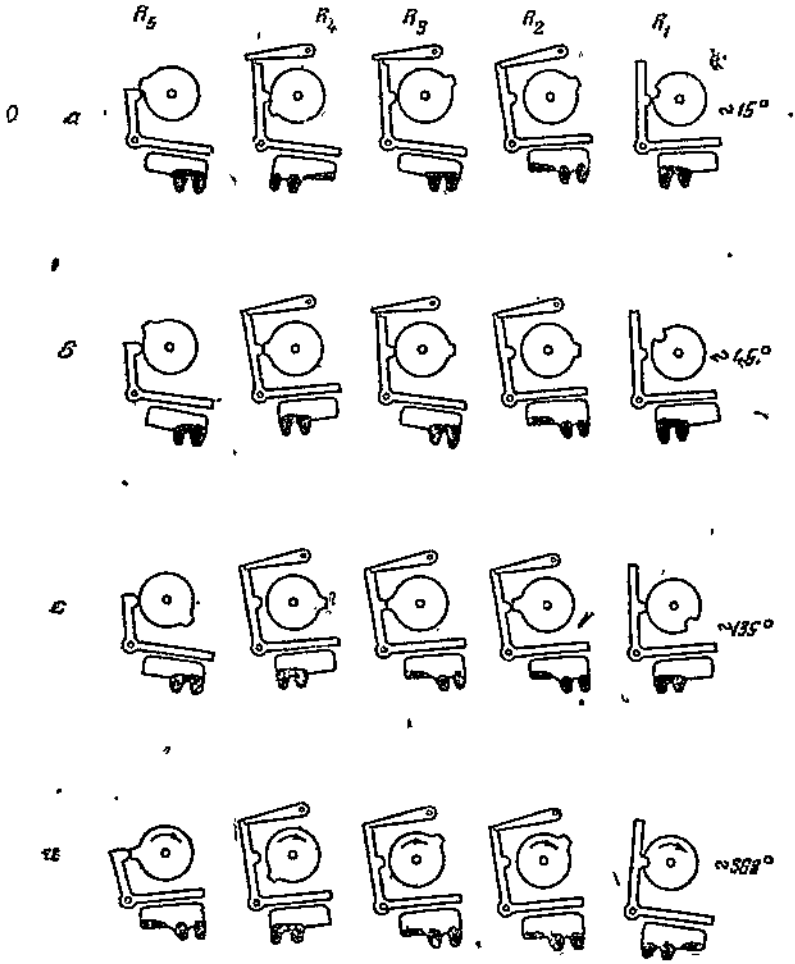


Рис. 367. Положения дисков реверсивного реле времени.

При соединении контакта *2м* с контактом *2с* реостаты r_1—r_3 выключены и балансирный мотор имеет наивысшую скорость. Соединение контакта *2м* с контактами *3с*, *4с* или *5с* вводит в цепь последовательно реостаты r_1, $r_1 + r_2$ и $r_1 + r_2 + r_3$, уменьшая постепенно скорость балансирного мотора. Таким образом, балансирный мотор может иметь четыре скорости.

Реостаты r_4, r_5, r_6 и r_7 играют ту же роль по отношению к мотору начального хода, позволяя получить три скорости мотора.

Продолжительность работы балансирного мотора определяется взаимным положением третьего и четвертого диска реле времени, которые могут быть установлены в любое положение.

Вышеприведенное описание действия регулятора сделано в предположении понижения температуры. При повышении температуры процесс будет итти в той же последовательности с тем лишь различием, что контактный гальванометр замкнет контакт K_2, сработают катушки XP_2-$П$ и R_2 вместо XP_3-$П$ и R_3. Дальнейшая работа регулятора будет протекать в прежней последовательности, но моторы исполнительного механизма будут вращаться в противоположную сторону.

Регулятор с одномоторным балансирным исполнительным механизмом. Значительно проще схема регулятора с одномоторным балансирным исполнительным механизмом, пред-

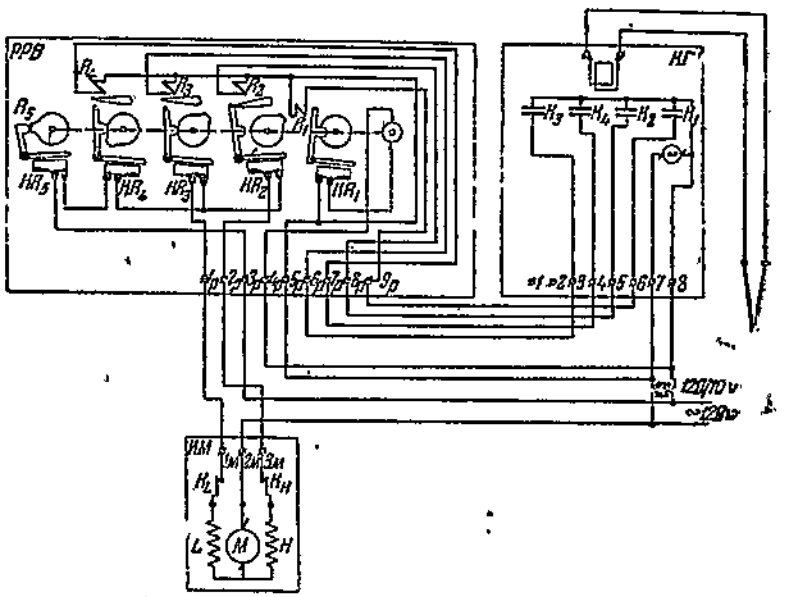


Рис. 368. Терморегулятор ВОТИ с одномоторным исполнительным механизмом:

$КГ$ — контактный гальванометр; $K_1 — K_4$ — контакты реле; $R_1 — R_4$ — катушки реверсивного реле; $КR_1 — К_5$ — контакты реверсивного реле; $ИМ$ — исполнительный реверсивный мотор.

ставленная на рис. 368. В этой схеме исключается стоп-реле и командные импульсы гальванометра передаются непосредственно реверсивному реле времени. Отсутствует в схеме и система реостатов, так как мотор исполнительного механизма имеет одну скорость. Действие схемы аналогично предыдущей.

При подаче импульса «повышено» гальванометр замыкает контакт K_2, чем возбуждается катушка R_2, притягивающая якорь

второго диска и тем самым замыкающая контакт KR_2. Через малый промежуток времени гальванометр замыкает контакт K_1, возбуждающий катушку R_1. Контакт KR_1 замыкается, и мотор реле приводится в действие. После поворота оси реле на 15° замыкается контакт KR_5, что включает мотор балансирного механизма, начинающий переставлять регулирующий орган в положение закрытия. Исполнительный механизм будет работать, пока кулачный механизм реле не разорвет контакт KR_4.

Работа с одномоторным механизмом значительно проще, чем с двухмоторным, при сохранении той же гибкости наладки регулятора.

В случае применения пятипозиционного гальванометра схемы остаются теми же, но в работу включается катушка R_4 и моторы исполнительного механизма имеют различную продолжительность вращения в зависимости от положения стрелки гальванометра.

При небольшом отклонении стрелки гальванометра одновременно замыкаются контакты K_4 и K_3 или K_2. Продолжительность вращения моторов определяется тогда взаимным расположением кулачков на четвертом диске и третьем или втором. При большем отклонении стрелки гальванометр замыкает один из контактов K_2 или K_3 и схема работает, как изложено выше.

Таким образом, при малом отклонении стрелки время работы моторов будет меньше, чем при большом отклонении.

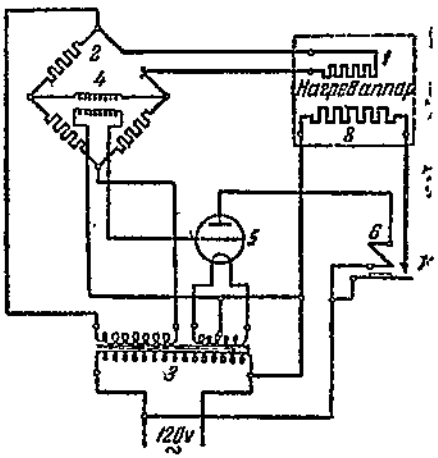


Рис. 369. Терморегулятор с электронным реле.

1 — термометр сопротивления; *2* — измерительный мостик; *3* — трансформатор питания; *4* — измерительный трансформатор; *5* — электронная лампа; *6* — высокоомное реле; *7* — нормально разомкнутые контакты реле; *8* — электрический нагреватель.

Схема терморегулятора с электронным реле приведена на рис. 369. Терморегулятор состоит из термометра сопротивления *1*, включенного в одну из цепей измерительного мостика *2*. Мостик питается переменным током от трансформатора *3*. В диагональ мостика включен измерительный трансформатор *4*. Система мостика отрегулирована на заданную температуру. При температуре, соответствующей норме, в измерительном трансформаторе нет тока и электронная лампа *5* проводит ток. Высокоомное реле *6* с нормально разомкнутыми контактами, включенное последовательно в анодную цепь лампы, возбуждено — якорь реле притянут и цепь электрического нагревателя *8* аппарата замкнута контактами *7*.

Повышение температуры нарушит равновесие моста, в измерительном трансформаторе появится ток и на сетку лампы будет подано смещающее напряжение.

Лампа *5* будет заперта, анодный ток прерван, якорь реле *6* отпадает, разорвав контакты *7* и выключив тем самым нагреватель *8*. При подходе тем-

пературы к норме лампа *5* будет отперта, реле *6* сработает, включив снова нагреватель.

Терморегулятор с газовым триодом интересен отсутствием движущихся частей и высокой чувствительностью и точностью работы.

Регулятор приспособлен к работе с электронагревателями. Принципиальная схема регулятора изображена на рис. 370. Измерительной частью регулятора является термопара *1*, присоединенная к зеркальному гальванометру *2*.

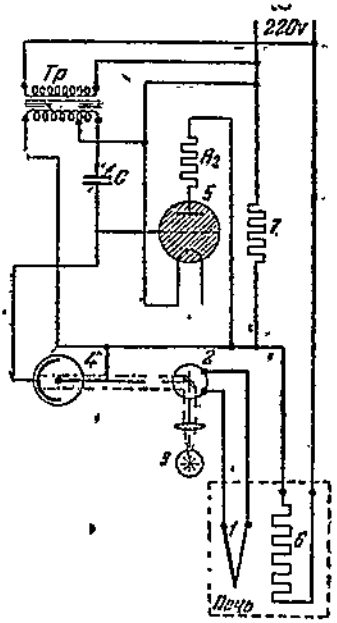


Рис. 370. Терморегулятор с газовым триодом:

1 — термопара; *2* — зеркальный гальванометр; *3* — осветительная лампа; *4* — фотоэлемент; *5* — газотрон; *6* — нагревательная обмотка; *7* — постоянное сопротивление.

В данном регуляторе необходимо точное сохранение постоянства температуры холодного спая термопары, что достигается термостатированием. Зеркальный гальванометр направляет луч света от осветительной лампы *3* на фотоэлемент *4*. Фотоэлемент *4* создает смещающее напряжение на сетке газотрона *5*, величина которого будет пропорциональна степени освещенности фотоэлемента. Таким образом, величина анодного тока газотрона будет определяться степенью освещенности фотоэлемента.

На нагревательную обмотку *6* аппарата ток поступает через две параллельные ветви, одна из которых образована постоянным сопротивлением *7*, а другая — анодной цепью газотрона.

Таким образом, основная часть питания нагревателя остается постоянной, регулятор же управляет некоторой добавочной частью питания. Например, при общем потреблении тока нагревателем в *18 а* непосредственное питание *15 а*, а регулируемый газотроном ток *3 а*.

По литературным данным, при температуре печи 880° погрешность регулирования не превышает 0,06°.

75. Специальные регуляторы

Электрические системы регуляторов легко приспособляются к регулированию самых различных параметров процесса и в этом отношении могут считаться универсальными.

Регулятор кислотности Лидса и Нортрупа. На рис. 371 представлена принципиальная схема регулятора кислотности промывной ванны системы Лидс и Нортруп.

Регулятор поддерживает постоянную кислотность ванны, равную 3% содержания кислоты. Степень концентрации измеряется кондуктометром по сравнению со стандартным раствором кислоты.

Измерительное устройство состоит из измерительного проточного сосуда *1* и сосуда сравнения *2*, погруженного в ту же ванну рядом с сосудом *1*. Этим достигается полная температурная компенсация. Электроды измерительного и стандартного сосуда включены в две ветви автоматического уравновешенного моста *3* с нуль-гальванометром *4*. Движок *5* моста автоматически передвигается по реохорду *6*, приводя мост в равновесие. При отклоне-

ний значения кислотности от нормы механизм моста замыкает один из контактов *7* или *8*, включающих катушки пускателя *9* реверсивного мотора *10* балансирного исполнительного механизма, переставляющего клапан *11*, подающий кислоту из сборника *12* в ванну.

Перо *13*, соединенное с движком реохорда, регистрирует колебания кислотности ванны. Система питается переменным током от трансформатора *14*.

Точность регулирования этим регулятором при установленной концентрации в 3% удерживается в пределах 2,9—3,1%.

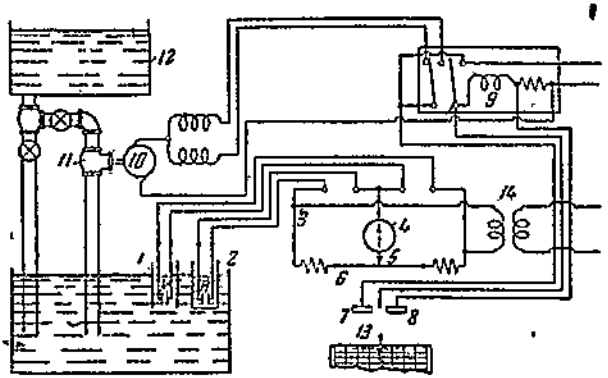


Рис. 371. Регулятор кислотности Лидса и Нортрупа:
1 — измерительный проточный сосуд; *2* — сосуд сравнения; *3*—автоматический равновесный мост; *4*—нуль-гальванометр; *5* — движок реохорда; *6* — реохорд; *7* и *8* — предельные контакты моста; *9* — магнитный пускатель; *10* — реверсивный мотор; *11* — регулирующий клапан; *12* — сборник кислоты; *13* — регистрирующее перо моста; *14* — питающий трансформатор.

Автоматический регулятор подачи углекислого газа в карбонизационные колонны. Подача углекислого газа в карбонизационные колонны содового производства обычно производится индивидуальными поршневыми газовыми насосами. Это объясняется необходимостью поддерживать постоянную подачу газа независимо от изменения величины сопротивления колонны. Неудобство и экономическая невыгодность установки и эксплоатации многочисленных, сравнительно малых машин вместо одной мощной заставило искать решения, позволяющего питать карбонизационные колонны от общего газового коллектора. Украинским институтом прикладной химии (УГИПХ) разработана система автоматической регулировки подачи углекислого газа.

На рис. 372 изображена схема регулирующего устройства. Для упрощения дана установка на две карбонизационных колонны, но система позволяет регулировать подачу газа в любое количество колонн.

Система автоматической регулировки состоит из регуляторов количества газа, установленных на трубопроводах, подводящих газ к каждой колонне, и общего командного регулятора, координирующего и коррегирующего работу регуляторов колонн в зависимости от колебаний давления газа в общем коллекторе. Вся система регулировки гидравлическая со струйными реле. Углекислый газ из коллектора *1* разводится к колоннам трубопровода-

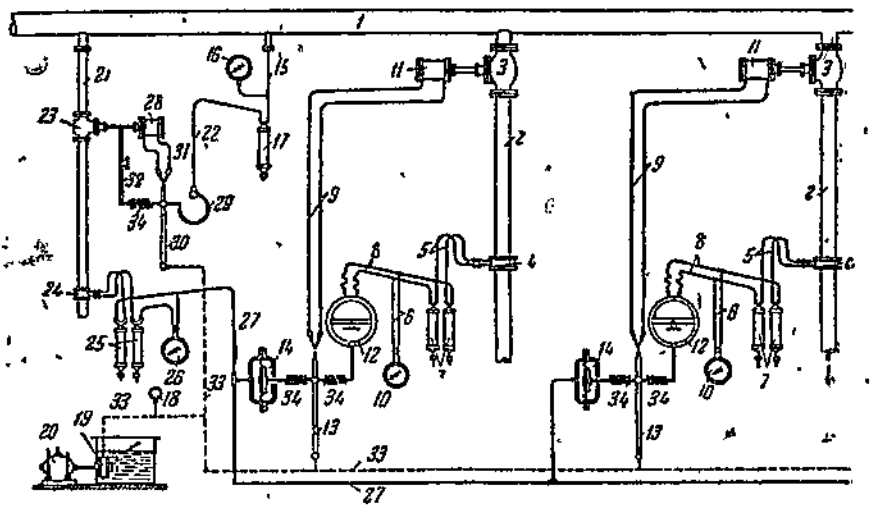


Рис. 372. Схема регулятора подачи углекислоты в карбонизационные колонны:
1 — газовый коллектор; *2* — трубопроводы к колоннам; *3* — регулирующие клапаны; *4* — измерительные диафрагмы; *5* — труба подвода давления к дифференциальным манометрам; *6* и *8* — трубки к дифференциальным манометрам и кольцевым весам; *7* — водоотводчики; *9* — трубопровод к исполнительному механизму; *10* — дифференциальные манометры; *11* — исполнительные механизмы; *12* — кольцевые весы; *13* — струйные трубки; *14* — измерительные мембраны; *15* — трубка к манометру; *16* — манометр; *17* — водоотделитель; *18* — масляный манометр; *19* — шестеренчатый насос; *20* — электромотор насоса; *21* — ответвление коллектора; *22* — соединительная трубка; *23* — игольчатый клапан; *24* — диафрагма; *25* — водоотделители; *26* — дифференциальный манометр; *27* — трубопровод к регуляторам колонн; *28* — исполнительный механизм командного регулятора; *29* — трубка Бурдона; *30, 31* — струйное реле командного регулятора; *32* — рычаг обратной связи; *33* — напорный маслопровод; *34* — соединительные пружины.

ми *2*. На каждом трубопроводе установлен регулирующий клапан *3* с масляным поршневым исполнительным механизмом *11*. За регулирующим клапаном в каждый трубопровод *2* вделана измерительная диафрагма *4*. Перепад давления, создаваемый диафрагмой, измеряется дифференциальным манометром *10* и кольцевыми весами *12*. На линиях *5*, подводящих давление к дифференциальным манометрам и кольцевым весам, установлены водоотводчики *7*, защищающие линии *6* и *8* от накопления в них влаги, которая может внести погрешности в показания дифференциальных манометров и кольцевых весов.

Кольцевые весы являются измерительным устройством колонного регулятора, воздействуя через пружинное соединение *34* на струйную трубку *13*. На эту же трубку в противоположном направлении действует измерительная мембрана *14*, связанная трубопроводом *27* с диафрагмой *24* командного регулятора. Командный регулятор состоит из игольчатого клапана *23*, установленного на ответвлении *21* от общего коллектора газа. Игольчатый вентиль управляется поршневым исполнительным механизмом *28*.

Действие исполнительного механизма вызывается струйным реле *30—31*, работающим от трубки Бурдона *29*, соединенной с коллектором газа трубками *22* и *15*. К трубке *15* присоединен манометр *16*, измеряющий давление газа в коллекторе, и водоотделитель *17*, устраняющий накопление конденсата в трубке *22*. Шток поршня исполнительного механизма *28* связан рычагом *32* и пружиной *34* со струйной трубкой *30*, образуя гибкую обратную связь исполнительного механизма со струйным реле регулятора. За игольчатым вентилем на трубе *21* установлена диафрагма *24*, пройдя которую, газ выходит в атмосферу. Перепад давления через водоотделители *25* передается на диференциальный манометр *26*, а давление перед диафрагмой по трубопроводу *27* на мембраны *14* регуляторов колонн. Струйные реле *13* и *30* питаются маслом от шестеренчатого насоса *19*, работающего от электромотора *20*. Давление масла измеряется манометром *18*, установленным на напорном маслопроводе *33*. Отработанное масло из реле возвращается в бак шестеренчатого насоса *19*.

Работа регулировочной системы протекает следующим образом. Дроссельные диафрагмы *4* и струйные реле *13* регуляторов колонн отрегулированы на подачу одинаковых количеств газа во все колонны. Воздействие кольцевых весов *12* и мембран *14* на струйные трубки *13* уравновешено, и трубки находятся в среднем положении.

При увеличении сопротивления какой-либо из колонн подача газа в эту колонну уменьшится, а следовательно, уменьшится перепад давления на соответствующей диафрагме *4*. Равновесие кольцевых весов этой диафрагмы будет нарушено, и струйная трубка отклонится вправо, вследствие чего исполнительный механизм *11* начнет переставлять клапан *3* в сторону большего открытия до тех пор, пока перепад давления или, что то же, количество газа, поступающего на данную колонну, не вернется к своей первоначальной величине. При этом струйная трубка возвращается в нейтральное положение и регулирующий клапан остается в новом положении.

Увеличение или уменьшение давления газа в общем коллекторе при различных положениях регулирующих клапанов *3* на колоннах изменит соотношение подачи газа на каждую колонну, т. е. нарушит правильность регулировки. Но в этом случае вступает в действие командный регулятор. Увеличение давления в коллекторе разгибает бурдоновскую трубку *29*, передвигая струйную трубку *30* влево, и исполнительный механизм *28* начинает увеличивать открытие игольчатого клапана *23*. Перестановка

игольчатого клапана вскоре прекращается действием обратной связи *32—34*, возвращающей струйную трубку в нейтральное положение. Таким образом, величина открытия игольчатого клапана всегда находится в зависимости от величины давления газа в коллекторе.

Одновременно положение игольчатого клапана определяет величину перепада давления на диафрагме *24* и величину усилий мембран *14* на струйные трубки *13* регуляторов колонн. В результате изменение давления в коллекторе одновременно приводит к изменению перепадов на диафрагмах регуляторов колонн и на диафрагме командного регулятора и давления на мембранах *14*.

Равновесие системы или вовсе не нарушается, или немедленно восстанавливается с изменением положения регулирующих органов.

Опыты показали, что новое равновесие наступает очень быстро и колебания регуляторов незначительны по амплитуде и продолжительности.

ГЛАВА XIX

ПРОГРАММНЫЕ И ЦИКЛИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

76. Программные регуляторы

Программные регуляторы применяются во многих процессах химических производств, где показатель регулирования должен быть подчинен времени или определенному закону изменения. В резиновом производстве, производстве пластмасс, анилинокрасочном и других имеются процессы, течение которых связано с изменением температуры, давления или иного параметра во времени.

В программном регулировании следует различать два случая.

1) Выдерживание плавного изменения показателя регулирования в течение определенного промежутка времени в пределах от начального значения до некоторого конечного. По достижении показателем регулирования заданного конечного значения в установленный промежуток времени, значение показателя регулирования поддерживается постоянным также в течение установленного промежутка времени, после чего регулятор прерывает процесс, прекращая подачу регулируемого агента.

2) Изменение значений показателя регулирования во времени по определенному закону с возвращением системы к первоначальному состоянию или остановкой процесса по достижении определенного конечного значения показателя регулирования.

Программный терморегулятор Эккардта. Примером программного регулятора первого типа может служить регулятор температуры Эккардта, устройство которого схематически представлено на рис. 373.

Основной принцип конструкции регулятора тот же, что у стабилизирующего регулятора, описанного в 74 разделе. Программный механизм регулятора состоит из диска времени *1*, приводимого во вращение часовым механизмом или синхронным мотором.

Диск несет на себе пружинную ленту *3*, по которой скользит движок *2*. Пружинная направляющая лента *3* образует криволинейный шаблон, определяющий закон и продолжительность плавного изменения показателя регулирования от начального значения до конечного. Движок *2* укреплен на рычаге *7*, имеющем неподвижную точку вращения *8*. На другом конце рычага *7* находится ось вращения *9* рычага *16*, передающего деформацию мем-

бранной коробки *10* через установочный винт *4* рычагу отбойной пластинки *5*. По мере поворота диска *1* движок *2* будет постепенно поворачивать рычаг *7* по часовой стрелке. Это вызовет смещение оси вращения *8* рычага *16* вниз и постепенный отход пластинки *5* от отверстия сопла *6*. В результате регулирующий клапан будет открываться больше и больше и температура в аппарате повышаться. Мембранная коробка *10* контролирует это повышение, действуя на отбойную пластинку через рычаг *16*, винт *4* и рычаг *5*.

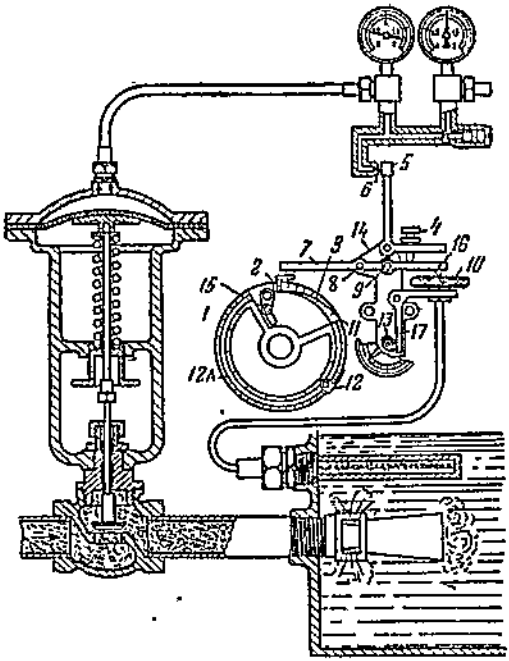


Рис. 373. Программный терморегулятор Эккардта:

1 — диск времени; *2* — движок регулятора; *3* — пружинная лента, устанавливающая программу; *4* — установочный винт; *5* — отбойная пластинка; *6* — сопло; *7* — программный рычаг; *8* — ось вращения программного рычага; *9* — ось вращения воспринимающего рычага; *10* — мембранная коробка; *11* — точка конца программы; *12* — сбрасыватель; *13* — установочный эксцентрик; *14* — доска; *15* — зажим программной ленты; *16* — воспринимающий рычаг; *17* — установочный рычаг.

Повышение температуры закончится в точке *1*, где кривая, образованная лентой *3*, сливается с боковой поверхностью диска *1*. Продолжительность стабильного участка температуры определяется положением сбрасывателя *12* по отношению к точке *11*. Сбрасыватель *12*, подойдя под движок *2*, отклоняет его в сторону и сбрасывает с диска. Это вызывает поворот рычага *7* под действием собственного веса против часовой стрелки и закрытие сопла *6*, в результате чего регулирующий клапан закрывается и процесс останавливается. Одновременно регулятор может подать сигнал окончания процесса.

Установка значения конечной температуры производится улиткообразным эксцентриком *13*, действующим на рычаг *17* и перемещающим мембранную коробку *10* вверх или вниз. Вращение улитки *13* по часовой стрелке поднимает коробку *10* вверх, что уменьшает предельное значение температуры. Положение ленты *3* на диске устанавливается зажимом *15*.

Программный регулятор Фоксборо. Второй тип программных регуляторов позволяет произвольно изменять значение показателя

регулирования по заданному закону. Например, от начальной температуры 90° в продолжение 2 мин. поднять температуру до 125°, выдержать эту температуру в течение 20 мин., затем в 1 мин. поднять до 135° и выдержать в течение 1 часа, далее в 1 мин. поднять до 145° и выдержать в течение 2 час. 30 мин. и, наконец, в течение 5 мин. снизить температуру до 100°.

Подобные задания могут выполняться программными регуляторами второго типа. Основным звеном регулятора является программный диск, вырезанный по окружности. Диск вращается часовым механизмом или синхронным мотором. По вырезам скользит щуп рычага, переставляющего механизм пневматического реле и изменяющего его настройку.

Система изменения настройки может быть подобна описанной в предыдущем разделе или иной.

На рис. 374 показано схематически устройство регулятора Фоксборо. Программный диск *1* своими вырезами ведет рычаг *2*, опирающийся на боковую поверхность диска щупом *3*. Рычаг *2* переставляет сопло *4*, приближая или удаляя его от отбойной пластинки *5*, управляемой манометрической пружиной *6*.

Изменение положения сопла вызовет изменение температурной настройки регулятора.

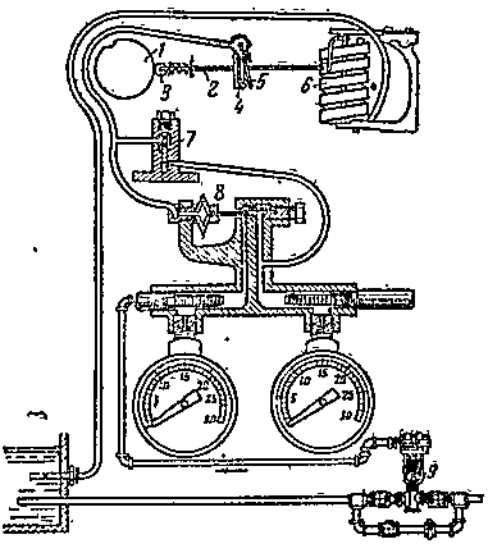


Рис. 374. Программный регулятор Фоксборо:

1 — программный диск; *2* — программный рычаг; *3* — щуп программного рычага; *4* — сопло; *5* — отбойная пластинка; *6* — манометрическая пружина; *7* — первичный дроссель; *8* — вторичное реле; *9* — мембранный исполнительный механизм.

77. Циклические регуляторы

Циклический регулятор представляет собой устройство, выполняющее определенный непрерывно повторяющийся круг рабочих операций, определяющих изменение состояния или положения объекта регулирования. Последовательность воспроизводимых регулятором операций остается всегда неизменной.

Длительность отдельных операций или состояний системы может определяться или заданными промежутками времени или достижением системой (объектом регулирования) определенных положений или состояний.

Иногда одни операции цикла будут определены временем, а другие — известными параметрами состояния или положения объекта регулирования.

Регулятор автоматической центрифуги. В качестве простейшего примера подобных регуляторов будет рассмотрен регулятор автоматической центрифуги.

Горизонтальная автоматическая центрифуга управляется электрогидравлическим регулятором, воспроизводящим полный цикл работы центрифуги.

Как известно, цикл работы центрифуги складывается из следующих операций:

загрузка центрифуги кристаллической суспензией;
центрифугирование для удаления маточного раствора;
промывка кристаллов;
центрифугирование для удаления промывной жидкости;
выгрузка кристаллов.

Продолжительность операций (кроме последней) устанавливается по времени применительно к свойствам обрабатываемого материала.

Продолжительность первой операции может быть установлена лучше по толщине слоя материала в барабане.

Последняя операция определяется движением выгружающего скребка в одну и другую сторону.

Регулятор позволяет в широких пределах варьировать продолжительность каждой из четырех первых операций в пределах от 0,5 до 20 мин.

Электрическая схема регулятора приведена на рис. 375. Регулятор состоит из мотора Уоррена *МУ*, вал которого делает один оборот в 15 мин.

На валу мотора насажены четыре шестерни *1—4*, являющиеся приводами четырех реле времени *I—IV*.

Каждое реле состоит из высокоомной катушки *5—8* со втягивающимся якорем. Якори *I—IV* реле несут на верхнем конце зубчатые сектора *9—12*, сцепляющиеся с шестернями *1—4* при втягивании якоря в катушку; к нижним концам якорей реле *I* и *III* прикреплены тяги *13* и *14*, управляющие струйными трубками *15* и *16*.

Первое реле имеет одну пару нормально разомкнутых контактов *17*; реле *II, III, IV* — две пары контактов: одну нормально замкнутых *18, 20, 22*, другую нормально разомкнутых *19, 21, 23*.

Пятое реле не имеет сектора времени, якорь его также снабжен двумя парами контактов — нормально замкнутых *38* и нормально разомкнутых *39*. Якорь пятого реле тягой *26* управляет струйной трубкой *27*.

В систему регулятора входят расположенные на кожухе центрифуги: измеритель толщины слоя *28* с двумя ртутными выключателями — нормально замкнутым *29* и нормально разомкнутым *30*, и электромагнитным возвратителем *31*, возвращающим измеритель в начальное положение, и два конечных ртутных выклю-

чателя *32* на *33*, действующих от траверзы выгружающего скребка.

Переключатель *ПК*, переставляемый от руки, настраивает регулятор на выполнение операции загрузки по толщине слоя или по времени.

Система регулятора приводится в действие кнопочной систе-

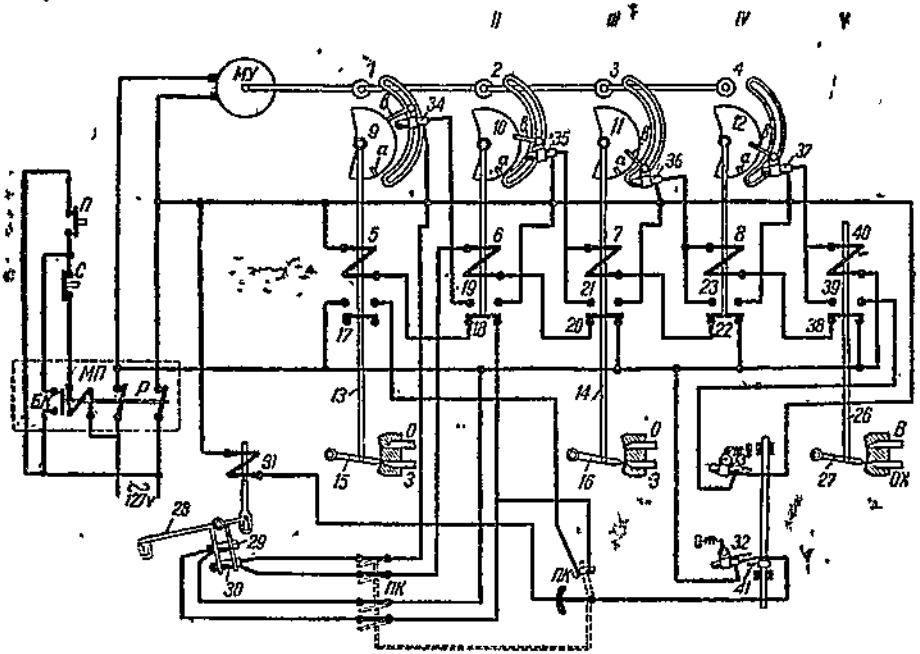


Рис. 375. Циклический регулятор автоматической центрифуги:

МУ — мотор Уоррена; *I—IV* — реле времени; *1—4* — приводные шестерни; *5—8* — высокоомные катушки реле времени; *9—12* — зубчатые сектора реле; *13—14* — тяги струйных трубок; *15* и *16* — струйные трубки; *17* — нормально разомкнутые контакты реле *I*; *18*, *20* и *22* — нормально замкнутые контакты реле *II*, *III* и *IV*; *19*, *21* и *23* — нормально разомкнутые контакты реле *II*, *III* и *IV*; *38* и *39* — контакты реле *V*; *26* — тяга якоря реле *V*; *27* — струйная трубка; *28* — измеритель толщины слоя; *29* и *30* — контакты измерителя слоя; *31* — электромагнитный возвратитель; *32—33* — конечные выключатели; *34*, *35*, *36*, *37* — выключатели реле времени; *38* и *39* — контакты реле *V*; *40* — катушка реле *V*; *41* — палец траверзы скребка; *П* — пусковая кнопка; *С* — кнопка остановки; *Р* — двухполюсный выключатель; *МП* — магнитный пускатель; *БК* — блок-контакт; *ПК* — переключатели.

мой, состоящей из кнопки пуска *П*, кнопки остановки *С* и магнитного пускателя *МП*.

Работа регулятора протекает следующим образом. Установка времени каждого реле производится передвижением ртутных выключателей (нормально разомкнутых) *34*, *35*, *36* и *37* по дугообразным направляющим в пределах угла 120°.

Шкалы, имеющиеся на дугах, градуированы в минутах от 0 до 20 мин.

При работе регулятора по толщине слоя выключатель первого реле устанавливается в крайнее положение на отметку 20 мин. и в работе не участвует.

Выключатель реле *II* устанавливается на отметку, соответствующую желаемой продолжительности центрифугирования, реле *III* на назначенную длительность промывки и реле *IV* на длительность центрифугирования после промывки.

Положение схемы на рисунке соответствует работе регулятора с загрузкой центрифуги по толщине слоя.

Нажимом на пусковую кнопку *П* возбуждается катушка магнитного пускателя, якорь которой замыкает двухполюсный выключатель *Р* и блок-контакт *БК*, блокирующий катушку пускателя.

Включение рубильника *Р* приводит в действие мотор Уоррена и одновременно через нормально замкнутый контакт *29* измерителя толщины слоя и нормально замкнутый контакт *18* реле *II* возбуждает катушку *5* реле *I*. Якорь реле втягивается, и струйная трубка *15* переставляется кверху, подавая масло в цилиндр поршневого механизма, открывая клапан подачи материала в барабан центрифуги.

По мере наполнения барабана толщина слоя увеличивается и, наконец, достигает щупа *28* измерителя толщины, щуп поворачивается, причем ртутный выключатель *29* размыкает цепь катушки *5*, а выключатель *30* замыкает цепь катушки *6* второго реле.

Якорь реле *I* падает, переставляя струйную трубку *15* в нижнее положение, что вызывает подачу масла в другую полость цилиндра впускного клапана и его закрытие.

Втягивание якоря реле *II* приводит сектор *10* в зацепление с шестеренкой *2*. Сектор начинает вращаться против часовой стрелки. По истечении заданного времени палец *а* сектора *10* дойдет до рычажка *b*, связанного с выключателем *35*, и, повернув его на некоторый угол, замкнет его контакты перелившейся ртутью. Замыкание цепи выключателя *35* возбудит катушку *7* реле *III*.

Якорь реле *III* будет втянут, в результате чего сектор *11* войдет в сцепление с шестерней *3*, контакты *20* разомкнутся, обесточив катушку *6* реле *II*, что вызовет падение якоря реле *II*, возвращение сектора *10* в начальное положение и размыкание выключателя *35*; контакты *21* замкнутся, блокируя катушку *7*, что будет удерживать ее якорь втянутым, несмотря на разрыв цепи выключателя *35*, и струйная трубка *16* переставится кверху, открывая соответствующим поршневым механизмом клапан подачи промывной жидкости.

По истечении установленного времени сектор *11* заставит сработать выключатель *36*, что вызовет срабатывание реле *IV* и обесточивание реле *III*, обратную перестановку струйной трубки *16* и прекращение подачи промывной жидкости.

Реле *IV*, действуя аналогичным образом, после назначенной выдержки времени замкнет выключатель *37*, который вызовет срабатывание реле *V*.

Размыкание контактов *38* реле *V* обесточит реле *IV*, заставив его возвратиться в начальное положение, а замыкание контактов *39* блокирует катушку *40* реле *V*, удерживая ее под током независимо от размыкания выключателя *37*.

Реле *V*, кроме того, переставит струйную трубку *27*, что через усилитель приведет в действие поршневой исполнительный механизм выгружающего скребка.

Когда скребок дойдет до крайнего верхнего положения, палец *41*, укрепленный к траверзе скребка, разомкнет выключатель *33*, что обесточит катушку *40* реле *V* и вызовет перестановку струйной трубки *27* в первоначальное положение. Поршневой механизм скребка изменит направление движения и начнет отводить скребок вниз.

Выключатель *33* вновь замкнется действием пружины, но реле *V* не сработает, так как блокировочные контакты *39* и выключатель *37* будут разомкнуты.

Палец *41* незадолго до прихода в крайнее нижнее положение, проходя мимо выключателя *32*, замкнет его на короткое время.

Замыкание выключателя *32* заставит сработать электромагнит *31*, якорь которого перебросит щуп измерителя толщины в рабочее положение. При этом выключатель *29* замкнется, а выключатель *30* разомкнется. Система придет в исходное положение и начнет новый цикл.

Циклы будут повторяться непрерывно один за другим, пока регулятор включен.

Выключение регулятора осуществляется кнопкой «стоп» *С*, обесточивающей катушку магнитного пускателя.

Если желательно загрузку центрифуги вести не по толщине слоя, а по времени, то щуп измерителя перебрасывают в нерабочее положение, а переключатель *ПК* переставляют в положение, указанное пунктиром. Выключатель *34* реле *1* устанавливают на нужный промежуток времени. Тогда замыкание контакта *32* непосредственно возбудит катушку *5* реле *1*, втягивание ее якоря замкнет блок-контакты *17*, удерживающие ее под током после размыкания выключателя *32*. Дальнейшая работа регулятора пойдет аналогично ранее изложенному, начавшись с замыкания выключателя *34*.

Механизм регулятора позволяет при выключенном токе ручное управление циклом, для чего предусмотрены рычажки, переставляющие струйные трубки *15*, *16* и *27* от руки.

В систему регулятора входит шестеренный масляный насос с мотором и масляным баком для питания гидравлического устройства управления.

Область применения циклических регуляторов. Комбинируя реле времени, приводимые мотором Уоррена, с конечными выключателями, управляемыми движущимися деталями рабочей маши-

ны, можно легко осуществить автоматизацию любого циклического процесса.

Работа гидравлических вулканизационных прессов, гидравлических прессов для изготовления изделий из пластмасс, управление газогенераторным процессом получения водяного газа и тому подобные рабочие циклы могут быть переведены на управление циклическими регуляторами.

Использование фотореле еще более расширяет возможности создания циклических регуляторов, позволяя отдельные операции цикла определять физико-химическими параметрами.

Химические производства представляют широкий простор для введения автоматического управления процессом, а современный уровень техники автоматического контроля и управления дает возможность успешного и эффективного решения для большинства непрерывных или циклических процессов.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абсолютное
давление 14
шкала температур 156
Абсорбциометр 298
Автоматические
весы 83 сл., 88 сл.
вискозиметр 310
потенциометр 199
регуляторы 313
Агенты
возмущающие 314
регулируемые 314
Ардометр 236
Ареометр 303
Армировка термопар 178
Атмосфера 13 сл.
Аэродинамический газоанализатор 271

Балансирные исполнительные механизмы 365 сл.
Барабан Крослея 104
Барабанный счетчик 96
Бария (микробар) 13
Безмены 83
Бендемана сопло 124

Вакуумметр
кольцевые весы 28
электрический 61
Вакуумные фотоэлементы 294
Вес
насыпной 15
объемный 15
удельный 15
Весы 82 сл.
автоматические ковшевые 84, 88
— порционные 83
— транспортерные 84, 89
кольцевые 26
ртутные 340
рычажные 83
Вискозиметры 241, 309 сл.
автоматический 310
Водомер
весовой 93
объемный 95
Водомерные стекла 69
Водослива метод 150
Водоуказательные стекла 73
Водяного столба, метры и миллиметры 13
Возвратитель стрелки 217
Возмущающие агенты 314
Возмущение 314
предел 316
Выравнивание 315
Вязкость 310 сл.

Газоанализаторы 240, 242 сл.
аэродинамический 271
механические 271
монтажная схема 273
насосные и редукторные установки 262
устройство для подачи воды 262
химические 244
— дуплекс 247
— Моно (симплекс) 251 сл.
— Эккардта 257
— забор и подача газа 258
— установка 257
— устройство 243
электрические 263, 265, 267 сл.
Газовые
термометр 158
часы 104
Газомер крыльчатый скоростной 107
ротационный 107
Газонолные фотоэлементы 294
Гальванометры
Депре д'Арсонваля 181
контактный 193
работа с термопарой 186
регистрирующие 187
фактор доброкачественности 185
электронный 288
Гидравлические реле 341
Арка (дроссельное) 343, 348
Аскания (струйное) 345, 349
Рейнеке 342
Гидростатические расходомеры 150
Градус 155
Густоты дыма измеритель 300

Давление 14
Диафрагма острая 109, 114 сл.
камерная 118 сл.
полукамерная 119
составная 121
тонкая 119
Дилатометрические термометры 159
Дистанционная передача показаний 74 сл.
Диференциальные
измерение фототока 296 сл.

Дифференциальные
манометры 34 сл., 54 сл.
расходомеры 126, 138
— колокольные 128, 137
— кольцевые весы 128, 138
— поплавковые 128, 130
тягомер 56
Дросселирующие измерители расхода 109
Дроссельные
приборы, установка 126
реле 343, 348
устройства 114
Дыма густоты измеритель 300

Единицы измерения
вязкости 310
давления 13
количества материалов 15
плотности 15
расхода материалов 15

Емкостный
манометр 56
мостик 57

Жезловая термопара 176
Жидкостные
манометры 19
термометры 160

Запаздывание 316
Золотники 342
Зубчато-секторный передаточный механизм 44

Избыточное давление 14
Излучение
измерение, методы 231
коэфициенты 234
Измерение
газгольдером 103
давления, единицы 13
излучения, методы 231
интенсивности излучения 229
количества материалов, единицы 15
концентрации водородных ионов 283
методом резонансной кривой 57
плотности, единицы 15
потенциометром 196
расхода газа 112
— материалов единицы 15
— жидкости 109
— пара 113
температур, ошибки 224
— термометрами сопротивления 208
цветности и прозрачности 290
электродвижущей силы термопары 181
Измерители
густоты дыма 300
количества
— жидкости, весовые 92
— сыпучих материалов 82, 92
количества и расхода 81
— газов 103
Измерители жидкости 92
объема жидкости, поршневые 97
плотности жидкости 302
Измерители
расхода жидкости и газа дросселирующие 109
температур 154
уровня 58
— пневматические 76
— поплавковые 72 сл.
— с градуированной лентой 74
— твердых сыпучих тел 77
— телепередача показаний 74, 75
Измерительно-координирующие устройства 317, 322, 335
Измерительные устройства
для стеклянного электрода 288
— сурьмяного электрода 289
Изодромный регулятор 320, 391, 393
Импульсная телепередача 74
Индукционные
мостик 47
передатчик манометра 51
Интегратор 132
Исполнительные механизмы
гидравлические 362
двухмоторный 369
классификация 361
мембранные 362
механические 362
поршневые 363
регулятора 317
с двумя магнитами 370
электромагнитные 369 сл.
электромоторные 364 сл.

Камерная диафрагма 118 сл.
Керамиковый фильтр 260
Килограмм 15
Кислотомеры 240
УГИПХ 153, 275 сл.
Шишёлова 151
Клапаны регулирующие
диапазон 326
разбивка окон 329
характеристика 325 сл., 328
Количества материалов единицы измерения 15
Коллектор 121
Колокол 333
Колокольные
манометры 30, 33
расходомер 128, 137 сл.
регуляторы 378 сл., 398
Колориметры 241, 298
Кольцевые
весы 26
— вакуумметр 28
— расходомер 138
мембрана 337
Компенсационные
метод 196
провода 202

Кондуктометры 275
Контактные
гальванометр 193
манометр 48
Контрольные
манометры 49
фильтр 261
Концентрация водородных ионов, измерение 283
Коробки мембранные 53
Коэфициенты
излучения 234
линейного расширения 160
Крыльчатый счетчик 102
Кубический метр 15
Линейного расширения коэфициенты 160
Литр 15
Логарифмическая характеристика клапана 328
Логометры 208, 216
возвратитель стрелки электромагнитный 217
Гейгера 47
регистрирующие 218
указывающие 218
Лучковая термопара 175
Манометрические
термометры 159, 163—166 сл.
терморегулятор 403
Манометры
Бурдона 44 сл.
выбор 67
дифференциальные 34 сл.
— пружинные 54
емкостный 56
жидкостные 19
классификация 18
колокольные 30 сл.
контактный 48
контрольные 49
мембранные 51 сл., 72
образцовые 50
поверка 64
поплавковые 27 сл.
поршневые 39
пресс для поверки 66
пружинные, трубчатые 42
пьезо-электрический 59
регистрирующие 46
с гелликоидальной трубкой 50
с наклонной трубкой 22
сопротивления 60
со спиральной трубкой 51
с плоской мембраной 51
с телепередачей 46
установка 62
чашечный 21
электрические 56
U-образный 19
Мембраны
гибкая 336, 339
измерительные 335
Мембраны
кольцевая 337
металлическая 338
сильфонная 339
сложные 53 сл., 338
Международная шкала температур 157
Мембранные
коробки 53
манометры 51 сл., 72
регуляторы 379, 381
— высокого давления 380 сл.
— температуры 381
тягомер 53
Мерники 94
Мессдозы 57
Методы
водослива 150
измерения излучения 231
— электропроводности растворов 277
компенсационный 196
определения числа pH 284
прямого измерения фототока 296
Метры водяного столба 13
Механизмы исполнительные 317, 361 сл.
балансирный 365 сл.
электромагнитные 369 сл.
электромоторные 364 сл.
Механические газоанализаторы 271
Микробар 13
Миллиметры ртутного и водяного столба 13
Микроманометры 24
Мостик
емкостный Карстена 57
индукционный 47
Кольрауша 277
Уитстона неравновесный 208, 211
— равновесно-неравновесный 213
— равновесный 208 сл.
Мотор Уоррена 189
Насыпной вес 15
Независимое регулирование 314
Нормальные
сопло 122
элемент Вестона 198
Нефелометры 241
Обратная связь 371 сл.
Объект регулирования, параметры 314
Объемный вес 15
Омметр Бруггера 214
Оптические
пирометры 231 сл.
плотность 291
Острая диафрагма 109, 114 сл.
Ошибки при измерении температуры 224
Параболическое сопло 124
Параметры объекта регулирования 314
Передатчик электродинамический 140
Переключатели 221 сл.
Перелин Кинга 106
Пирометры 154
Гольборн-Курлбаума 232

Пирометры
излучения 159, 229
оптические 231 сл.
полного излучения 159
радиационные 231, 235 сл.
термоэлектрические 159, 168
частичного излучения 159
Плотномеры 241
Института азота 307
Кента 306
с компенсацией температуры 305
с погруженным поплавком 306
Фолькварца 303
Эккардта 304
Плотность единицы измерения 15
— оптическая 291
Пневматические измерители уровня 76
Поверка
манометров 64
термопар 204
Поворотный переключатель 223
Погрешности
радиационных пирометров 237
регулирования 316
электрических газоанализаторов 265
Поплавковые
измерители уровня 72 сл.
манометры 27 сл.
— профильный 29 сл.
расходомеры 131 сл.
регуляторы 375
— уровня 383
Поплавок 332
Поправка на температуру холодного спая 172
Поршневые
измерители жидкости 97
манометры 39
счетчик Кеннеди 97
Потенциометр автоматический 199
Предел регулирования 316
Пресс для проверки манометров 66
Приборы
ареометрические 302
для измерения объема жидкости 94
с дальнодействующим передатчиком 6
Рухгольца 40
Провода компенсационные 202,
Программные
регулирование 314
регуляторы 415 сл.
Пропорциональный регулятор 390
Пружинно-пластинчатый переключатель 222
Пьеза 13
Пьезо-электрический манометр 59

Радиационные пирометры 231, 235
Расхода материалов единицы измерения 15
Расходомеры 81
Расходомеры
гидростатические 150
дифференциальные 126 сл.
колокольный Ленэнерго 137
— малый перепадов 138
кольцевые весы 138
поплавковый Тизприбора 131
— ВТИ 134
— Сименса 136
постоянного перепада 142
— с кольцевым проходом 144
скоростные 101
сопловой 150
Регистрирующие
гальванометры 187
манометры 46
приборы 6
Регулирование 313 сл.
погрешность 316
предел 316
связанное 314
Регулируемые агенты 314
Регулирующие
задвижки 324
заслонки 323
клапаны 325
органы 323
Регуляторы
автоматические 313, 318, 388, 392, 397
автоматической центрифуги 417
давления двухпозиционный 389
— завода КИП 385
— Савалля 377
— с реле Аскания 385
— с уравновешенной заслонкой 378
— Эккардта 388
изодромный 320, 391, 393
кислотности 410
колокольные 378
— для малых давлений 398
— с двухседельным клапаном 378
— с ртутным заполнением 379
мембранные 379
— Бамаг 381
— высокого давления 381
— с двухседельным клапаном 380
— с разгруженным клапаном 380
— температуры 381
непрямого действия 317, 383, 385, 388 подачи углекислого газа в карбонизационные колонны 411
по первой производной 322
поплавковые 375
программные 415
— Фоксборо 416
— Эккардта 416
пропорциональный 390
прямого действия 317, 375
расхода 386
соотношения расходов 387, 395

Регуляторы
специальные 410
степень неравномерности 317
трехпозиционный 320
температуры 400
уровня
— ВОТИ 405, 408
— Ганнемана 376
— поплавковый Арка 383
— Росат 376
— с электрическим управлением 384
характеристика 317
циклические 417, 421
чувствительность 319
шаговой 320
Реле
гидравлические 341
— Арка (дроссельное) 343, 348
— Аскания (струйное) 345, 349
— вторичные 348
— Рейнеке 342
электрические 350
электромагнитные 351
— с выдержкой времени 353
— самоблокирующиеся 352
электромоторные, времени 354
— реверсирующие 355
электронные 357, 359
— с выдержкой времени 359
Реперы шкалы, главные 155
Ротаметры 144 сл.
нормальный тип 149
парциальный 149
регистрирующий 149
с магнитным указателем 149
Ротационный газомер 107
Ртутного столба, миллиметры 13
Рычажный переключатель 221
Связанное регулирование 314
Связь обратная 319, 371 сл.
Селективный фотоэффект 293
Сельсинный передатчик 75
Сигнализатор уровня 78
Сила электродвижущая
Пельтье 168
различных металлов 175
Томпсона 169
Сильфонная мембрана 339
Сильфоны 53
Скоростные
крыльчатый газомер 107
расходомеры 101
Солемеры 241, 275 сл.
Гейгера и Шмидта 279
Сименса и Гальске 280
ЦЛЭММ 281
Сопла 109
Бендемана 124
нормальное 122
параболические 124
Сопротивление платины 208
Спектральные характеристики фотоэлементов 294
Стабилизирующее регулирование 313
Стекла водоуказательные 69 сл.
Стоп-реле 195
Схемы
дифференциальная с двумя фотоэлементами 295
— с одним фотоэлементом 297
фотометрические 295
Счетчики 81
барабанный 96
Вольтмана 101
дисковый 99
жидкости 96
крыльчатый 102
поршневой 97
Температура 154
Температурная шкала 155
Температурные коэфициенты электропроводности растворов 277
Теплопроводность газов и паров 264
Термометры 154
биметаллический 160
газовый 158
дилатометрические 159
жидкостные 160
манометрические 159, 163 сл.
расширения 159
ртутный 161
сопротивления 159, 206
— источники питания 223
— медный 210
— платиновый 208, 210
— проводка, переключение 218
технические, классификация 159
Термопары 168
армировка 178
градуировочные данные 178
измерение эдс 181
жезловая 176
конструкции 175
лучковая 175
материалы 173
поверка и градуировка 204
промышленные 176
характеристические кривые 172
Терморегуляторы
ВОТИ 405
Дирет 400
манометрический 403
с газовым триодом 410
с электронным реле 409
Тизприбор 404
электрические 405
Термостаты 202 сл.
Термоэлектрические пирометры 159, 168
Термоэлектродные материалы 173 сл.
Техническая атмосфера 13 сл.
Технические термометры 159
Тонкая диафрагма 119
Тонна 15

Трехпроводная система 220
Труба Вентури 109, 125
Трубка Бурдона 42
Тягомеры
дифференциальный 56
Крелля 22
мембранный 53
Удельный вес 15
Указатели уровня, сниженные 69 сл.
Указывающие приборы 6
Уровнемеры
сыпучего материала 78
узкого диапазона 69
широкого диапазона 73
Уровня
измерители 68
сигнализатор 78
Установка
дроссельных приборов 126
манометров 62
термопар 201
Устройства
дроссельные 114
для подачи воды 262
измерительно-координирующие 317, 332 сл.
Утомляемость фотоэлементов 294
U-образный манометр 19
дифференциальный 34
Фактор доброкачественности гальванометра 185
Физическая атмосфера 13
— керамиковый 260
— контрольный 261
— осушающий Моно 261
— осушающий Моно 261
— пылевой 260
— химические 262
Фотометрические схемы 295
Фотореле 360
Фотосопротивления 295
Фотоэлектрическая характеристика металлов 293
Фотоэлементы 292 сл.
Фотоэффект селективный 293
Характеристика
клапана 325 сл.
регулятора 317
фотоэлектрическая металлов 293
фотоэлементов спектральные 294
Характеристические кривые термопар 172
Химические газоанализаторы
для горючих газов 254
дуплекс 247
забор и подача газа 258
Моно для кислорода 252
Моно-симплекс 251
симплекс 247, 252 сл.
установка 257
устройство 243
Эккардта 257
Химические фильтры для газа 262
Холодный спай, поправка на температуру 172
Цветности и прозрачности измерение 290
Центнер 15
Циклические
регулирование 313
регуляторы 417, 421
Часы газовые мокрые 104
Чашечный манометр 21
Шкалы
абсолютная 156
температурные 155
— главные реперы 155
— основные точки 157
Щеточный переключатель 222
Эквивалентная электропроводность растворов 276
Электрические
вакуумметр 61
газоанализаторы 263, 265, 267 сл.
манометры 56
реле 350
терморегуляторы 405
Электродвижущая сила
Пельтье 168
различных металлов 175
Томпсона 169
Электродинамический передатчик 140
Электромагнитные исполнительные механизмы 369 сл.
Электромоторные исполнительные механизмы 364 сл.
Электронные
гальванометр 288
реле 357, 359
Электропроводность растворов 266 сл.
Элемент нормальный Вестона 198

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
Введение 5

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ

Измерители давления, количества материалов и их расхода

Глава I. Измерение давления, количества материалов и их расхода . 11
1. Общие сведения 12
2. Единицы измерения давления 12
3. Единицы измерения количества и расхода материалов . . . 15
Глава II. Манометры 18
4. Классификация измерителей давления 18
5. Простые жидкостные манометры 19
6. Усовершенствованные жидкостные манометры 26
7. Жидкостные дифференциальные манометры 34
8. Поршневые манометры 39
9. Пружинные трубчатые манометры 42
10. Мембранные манометры 51
11. Пружинные дифференциальные манометры 54
12. Электрические манометры 56
13. Установка и поверка манометров 62
Глава III. Измерители уровня 68
14. Общие сведения 68
15. Уровнемеры узкого диапазона 69
16. Уровнемеры широкого диапазона 73
17. Измерители уровня твердых сыпучих тел 77
Глава IV. Весовые и объемные измерители количества и расхода материалов 81
18. Общие сведения 81
19. Измерители количества твердых сыпучих материалов . . . 82
20. Измерители количества и расхода жидкостей 92
21. Измерители количества и расхода газов 103
Глава V. Дросселирующие измерители расхода жидкостей и газов . 109
22. Теоретические основы измерения расхода дросселированием . 109
23. Дроссельные устройства 114
24. Установка дроссельных приборов 125
25. Поплавковые, колокольные и типа кольцевых весов расходомеры 130
26. Расходомеры постоянного перепада давления 142
27. Гидростатические расходомеры 150

ЧАСТЬ ВТОРАЯ

Измерители температур

Глава VI. Общие понятия. Термометры расширения 154
28. Общие сведения. Температурные шкалы 154
29. Дилатометрические термометры 159
30. Манометрические термометры 163

Глава VII. Термоэлектрические пирометры 168
31. Электродвижущие силы термопар 168
32. Материалы и конструкция термопар 173
33. Измерители электродвижущих сил 181
34. Установка термоэлектрических пирометров 201

Глава VIII. Термометры сопротивления 206
35. Материалы термометров сопротивления 206
36. Мосты Уитстона 211
37. Измерение температур логометром 214
38. Проводка, переключение и питание током 218
39. Ошибки при измерении температур и способы их устранения . 224

Глава IX. Пирометры излучения 229
40. Измерение интенсивности излучения 229
41. Оптические пирометры 232
42. Радиационные пирометры 235

ЧАСТЬ ТРЕТЬЯ

Определители состава и качества материалов

Глава X. Определение состава и качества материалов в промышленности 239
43. Общие сведения 239
44. Объекты определений 240
45. Классификация определителей состава и качества материалов . 240

Глава XI. Газоанализаторы 242
46. Общие сведения и классификация газоанализаторов 242
47. Устройство химических газоанализаторов 243
48. Условия установки и работы химических газоанализаторов . . 257
49. Электрические газоанализаторы 263
50. Механические газоанализаторы 271

Глава XII. Кислото- и солемеры 275
51. Кондуктометрические измерения 275
52. Солемеры 279
53. Измерение концентрации водородных ионов 283

Глава XIII. Измерители цветности и прозрачности 290
54. Методы измерения цветности и прозрачности 290
55. Фотоэлементы 292
56. Фотометрические схемы и приборы 295

Глава XIV. Измерители плотности и вязкости жидкости 302
57. Плотномеры с плавающим поплавком 302
58. Плотномеры с погруженным поплавком 306
59. Вискозиметры 309

ЧАСТЬ ЧЕТВЕРТАЯ

Автоматические регуляторы

Глава XV. Основные понятия о регулировании и регуляторах . . . 313
60. Общие сведения о регулировании производственного процесса . 313
61. Принципы устройства и характеристика регулятора 316
62. Виды регуляторов 320

Глава XVI. Элементы и детали регуляторов 323
63. Регулирующие органы 323
64. Измерительно-координирующие устройства 332
65. Гидравлические реле 341
66. Электрические реле 350
67. Исполнительные механизмы 361
68. Обратная связь 371

Глава XVII. Регуляторы прямого действия 375
69. Поплавковые регуляторы 375
70. Колокольные регуляторы 378
71. Мембранные регуляторы 380

Глава XVIII. Регуляторы непрямого действия 383
72. Регуляторы уровня 383
73. Регуляторы давления, количества материалов и их расхода . . 385
74. Регуляторы температуры 400
75. Специальные регуляторы 410

Глава XIX. Программные и циклические регуляторы 415
76. Программные регуляторы 415
77. Циклические регуляторы 417
Предметный указатель 423

Отв. редактор *Г. П. Лучинский.* Техн. редактор *М. С. Лурье.*

А17450. Сдано в производство 29/VI 1944 г. Подписано к печати 11/IV 1945 г.
Формат 60×92¹/₁₆. Печатных листов 27. Уч.-изд. листов 38.
Типогр. знаков в печ. листе 56020. Тираж 10000. Цена 40 руб. Заказ тип. 3311.

Тип. Профиздата. Москва, Крутицкий вал, 18.