

Министерство науки и высшего образования РФ
Иркутский национальный исследовательский технический университет

АВТОМАТИЗАЦИЯ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Практикум



Издательство
Иркутского национального исследовательского технического университета
Иркутск - г.

УДК 681.5.08

ББК 34

P93

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом ИРНИТУ

Рецензенты:

.

Тематический редактор:

Авторы:

канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и управления
Института высоких технологий ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» **Ю.Э. Голодков.**

Голодков Ю.Э. Автоматизация биотехнологических производств:
Практикум. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 20__ . – 96 с.

Соответствует требованиям ФГОС ВО по направлению подготовки
19.04.01 Биотехнология.

Представлены основные сведения относительно средств измерений, применяемых для контроля и управления технологических процессов в промышленности, формирования навыков расчета измерительных схем и обоснования выбора информационно-измерительных устройств. Приведены практические примеры инженерных расчетов и задания для самостоятельной работы студентов.

Предназначено для выполнения магистрантами индивидуальных заданий на практических занятиях

© Голодков Ю.Э., 20__

© ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», 20__

Оглавление

Введение.....	
1. ПЕРЕЧЕНЬ И ТЕМАТИКА АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ.....	5
2. ЗАДАНИЯ НА АУДИТОРНУЮ РАБОТУ.....	6
2.1. Практическое занятие 1. Основные понятия и определения.....	6
2.2. Практическое занятие 2,3. Контактные средства контроля температуры.....	9
2.3. Практическое занятие 4. Бесконтактные средства контроля температуры	18
2.4. Практическое занятие 5. Средства контроля давления.....	22
2.5. Практическое занятие 6. Средства контроля уровня жидких и сыпучих сред.....	25
2.6. Практическое занятие 7. Расходомеры переменного перепада давления с СУ и ОНТ.....	30
2.7. Практическое занятие 8. Расходомеры вихреакустические.....	38
2.8. Практическое занятие 9. Расходомеры электромагнитные.....	41
2.9. Практическое занятие 10. Анализаторы рН растворов.....	43
2.10. Практическое занятие 11. Хроматографы - анализаторы многокомпонентных смесей.....	46
2.11. Практическое занятие 12. Кондуктометрические концентратомеры.....	49
2.12. Практическое занятие 13. Плотномеры.....	53
2.13. Практическое занятие 14. Приборы контроля влажности.....	55
2.14. Практическое занятие 15. Средства визуализации данных.....	61
2.15. Практическое занятие 16. Исполнительные механизмы и регулирующие органы.....	71
2.16. Практическое занятие 17. Микроконтроллеры	82
2.17. Практическое занятие 18. Условные обозначения средств контроля и управления в проектных документах.....	86
Заключение.....	91
Список рекомендуемой литературы.....	92
Приложение А.....	94

Введение

Суверенитет, безопасность, здоровье и социальное благополучие граждан любого государства зависит от состояния и развития собственной промышленности лекарственных средств. Современные технологии производства лекарственных средств и биологически активных веществ позволяют удовлетворить самые изысканные требования потребителей. Для повышения эффективности процесса производства, улучшения качественных показателей состава и свойств готовых продуктов в фармацевтической промышленности в настоящее время используются новейшие автоматизированные системы управления технологическими процессами на основе цифровой техники и информационных технологий.

Автоматизация фармацевтической промышленности позволяет решить проблемы, обусловленные многообразием видов и форм аппаратурно-технологических процессов, протекающих в непрерывных, непрерывно-дискретных и дискретных режимах. При выборе структуры систем автоматического управления необходимо также учитывать специфику организации производств лекарственных средств, связанную с жестко нормированным временем переработки отдельных видов сырья, его переменным составом и свойствами, а также высоким уровнем требований к качественным показателям готового продукта. Приборы и устройства автоматики, прежде всего, обеспечивают обслуживающий персонал своевременной и достоверной информацией о технологических параметрах, а также управляют производством продукции в автоматическом режиме.

В связи с этим будущему специалисту биоинженерии необходимы определенные компетенции, знания в области автоматизации, средств измерения, контроля технологических параметров производств.

Практические занятия предназначены для закрепления и углубления теоретического материала, приобретения навыков расчета измерительных схем и оценки показателей точности информационно-измерительных устройств. Каждый магистрант на практическом занятии должен выполнить расчеты по заданной теме, применяя программное обеспечение кафедры. Результаты выполнения задания на практическое занятие должны содержать теоретическую часть, программу и результат расчета, оформляться в соответствии с требованиями стандарта СТО 005-2020 (ИРНИТУ) [24] и могут быть представлены в электронном виде.

Цель изучения дисциплины заключается в предоставлении студентам сведений об информационно-измерительных системах на базе анализаторов состава и качества жидких, газообразных и твердых продуктов технологии и производств лекарственных средств и БАВ.

Основными задачами изучения дисциплины являются: изучение принципа действия, метрологических характеристик, устройства, области применения и методов поверки анализаторов количественного и качественного анализа.

1. ПЕРЕЧЕНЬ И ТЕМАТИКА АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

Согласно учебному плану программы магистратуры 19.04.01 Биотехнология, Технология биологически активных веществ и рабочей программе дисциплины «Автоматизация биотехнологических производств» рекомендованы следующие темы практических занятий, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Перечень практических занятий

№ п/п	Тема	Номер и наименование практического занятия	Кол-во акад. часов	Всего
1	Вводная. Основные понятия и определения	1. Основные понятия и определения	2	2
2	Приборы для контроля температуры и давления	2,3. Контактные средства контроля температуры	4	8
		4. Бесконтактные средства контроля температуры	2	
		5. Приборы и преобразователи давления	2	
3	Приборы для контроля уровня жидких и сыпучих продуктов	6. Приборы для контроля уровня жидких и сыпучих сред	2	2
4	Измерительные преобразователи расхода и количества	7. Расходомеры переменного перепада давления	2	6
		8. Вихреакустические расходомеры	2	
		9. Электромагнитные расходомеры	2	
5	Анализаторы состава и концентрации	10. Анализаторы pH	2	8
		11. Хроматографы	4	
		12. Кондуктометрические концентратомеры	2	
6	Плотномеры	13. Плотномеры	2	2
7	Влагомеры	14. Приборы контроля влажности	2	2
8	Технические средства для управления технологическими процессами	15. Средства визуализации данных	2	6
		16. Исполнительные механизмы и регулирующие органы	2	
		17. Микроконтроллеры	2	
9	Элементы проектирования систем контроля и управления пищевых технологий	18. Условные обозначения средств контроля и управления в проектных документах	3	3
	Всего		39	39

2. ЗАДАНИЯ НА АУДИТОРНУЮ РАБОТУ

2.1. Практическое занятие 1. Основные понятия и определения

Содержание занятия: Определение и классификация средств измерений и контроля (СИК). Метрологические характеристики (МХ) средств измерений и контроля. Значение приборов контроля и управления.

Основной материал:

СИ – это технические средства измерений, имеющие нормированные метрологические характеристики и предназначенные для измерений.

Средства измерений по своему назначению делятся на меры, измерительные преобразователи (датчики), измерительные приборы, измерительные устройства и измерительно – информационные системы.

К метрологическим характеристикам средств измерения относятся:

- **номинальная статическая характеристика (НСХ)** как зависимость между выходной величиной (сигналом) СИ и технологическим параметром на входе при нормальных условиях окружающей среды (например, для термометра сопротивления зависимость сопротивления чувствительного элемента от температуры, выражаемая уравнением, таблицей ГОСТа или условным обозначением: $R_t = R_0(1 + \alpha t)$, 100П;
- **диапазон измерений**, рабочий диапазон как разность между максимальным и минимальным значением шкалы СИ.
- **класс точности**, основная допускаемая погрешность СИ (приводится на шкале и в паспорте СИ);
- **цена деления**, ЕМР;
- **чувствительность** СИ, определяемая как отношение изменения выходного сигнала датчика к изменению технологического параметра, вызвавшего это изменение: $S = \Delta I / \Delta t$.

Измерительный преобразователь - это средство измерения, преобразующее физическую величину (технологический параметр) в выходной сигнал, т.е. обеспечивает на выходе величину, находящуюся в определенной зависимости со входной величиной.

Например, измерительный преобразователь – термоэлектрический преобразователь (термопара). Преобразует температуру в значение термоЭДС. Измерительный преобразователь – термометр сопротивления (ТС) преобразует температуру в электрическое сопротивление и т.д.

Датчик – это совокупность измерительного, нормирующего, беспроводного или аналогово-цифрового преобразователей. Например, датчик давления МЕТРАН - 150, датчик температуры МЕТРАН- 261.

Информационно-измерительная система – это совокупность средств измерений и средств микропроцессорной техники.

Технологические измерения, информационное обеспечение в любом технологическом процессе являются необходимой предпосылкой и обязательной составной частью системы автоматизированного или

автоматического управления этим процессом. Чтобы эффективно управлять технологическим процессом, получать продукцию с минимальными затратами и высокого качества, необходимо иметь своевременную достоверную информацию о процессе. В соответствии с федеральным законом от 26 июня 2008 г. N 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (с изменениями и дополнениями) [27] при сертификации продукции должны измеряться и проверяться характеристики продукции, её состав и показатели качества. Для измерения этих параметров в ходе технологического процесса или в испытательных лабораториях необходимы информационно-измерительные системы, различные средства измерения и контроля технологических параметров пищевых производств.

Метрология – наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Единство измерений – это такое состояние измерений, когда их результаты выражаются в узаконенных единицах, а погрешности результатов измерений известны и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы.

Значение физической величины (ФВ) - выражение размера ФВ в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Значение физической величины действительное – это значение физической величины, полученное экспериментальным путем и максимально близкое к истинному значению

Значение физической величины истинное – это значение ФВ, которое идеальным образом характеризует в качественном и количественном отношении соответствующую физическую величину.

Измерение физической величины – совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу ФВ, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

Измерение абсолютное основано на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант. Понятие «абсолютное измерение» применяется как противоположное понятию «относительное измерение» и рассматривается как определение величины в ее единицах.

Измерение косвенное - измерение, при котором искомого значения ФВ определяют на основании результатов прямых измерений других ФВ, функционально связанных с искомой величиной.

Измерение многократное - измерение физической величины одного и того же размера, результат которого получен из нескольких следующих друг за другом измерений, т.е. состоящее из ряда однократных измерений.

Измерение однократное - измерение, выполненное один раз. Например, измерение конкретного момента времени по часам.

Измерение относительное – это измерение отношения величины к одноименной величине, играющей роль единицы, или измерение величины по отношению к одноименной величине, принимаемой за исходную.

Измерение прямое – измерение, при котором искомое значение физической величины находят непосредственно по показаниям средства измерения.

Измерения динамические – это измерения, изменяющиеся по размеру физической величины.

Измерения метрологические выполняются при помощи эталонов с целью воспроизведения единиц физической величины для передачи их размера рабочим средством измерения (СИ).

Измерения неравноточные - ряд измерений какой-либо величины, выполненных различающимися по точности средствами измерения и в различных условиях.

Измерения равноточные - ряд измерений какой-либо величины, выполненных одинаковыми по точности средствами измерения в одних и тех же условиях с одинаковой тщательностью.

Измерения совместные – одновременные измерения двух или нескольких разнородных величин для установления зависимости между ними. Например, одновременное измерение температуры и электрического сопротивления датчика для нахождения температурного коэффициента сопротивления металла датчика.

Измерения совокупные – измерение одновременно нескольких одноименных величин, при которых искомые значения величин находят решением системы уравнений, полученных при измерении этих величин в различных сочетаниях

Задание 1.

Определить, к какой категории средств измерения относится указанное в задании средство измерения (таблица 2), назвать его метрологическую характеристику. Номер является вариантом задания.

Таблица 2

Варианты задания по выбору средств измерения

№	СИ и МХ	№	СИ и МХ
1	Гиря, 1 кг	11	Рулетка, 5м
2	Термометр медицинский, 30 -41° С	12	КСМ, ± 0,5 гр. Цельсия
3	Линейка школьная 0...20 см	13	Вольтметр 0...220 В
4	Амперметр, кт 1.0	14	Барометр 0...1000 кПа
5	Манометр 0...6 кПа	15	Уровнемер ± 5 мм
6	Вольтметр 0...220 В	16	ЦИП, ЕМР 9999
7	Барометр 0...1000 кПа	17	Цип, КТ 0,5

8	Уровнемер ± 5 мм	18	Вольтметр 0...220 В
9	ЦИП, ЕМР 9999	19	Барометр 0...1000 кПа
10	ЦИП, КТ 0,5	20	Уровнемер ± 5 мм

Контрольные вопросы

1. Определить, к какому виду средств измерений (меры, датчики, измерительные преобразователи, измерительное устройство, измерительные приборы, измерительные системы) относятся следующие средства измерений:
 - термометр ртутный стеклянный;
 - линейный метр;
 - счетчик холодной воды;
 - термометр манометрический
2. Дать определение таким понятиям, как метрология, единство измерений, датчик, мера, измерительный преобразователь, ИИС.

Литература

1. [26].
2. [27].

2.2. Практическое занятие 2.3. Контактные средства контроля температуры

Содержание занятия: Понятие температуры, температурная шкала. Классификация средств контроля температуры по назначению, функциям, точности. Контактные средства измерений температуры: термометры расширения, манометрические термометры, термопреобразователи сопротивления, термоэлектрические преобразователи.

Основной материал:

Температурой называют величину, характеризующую тепловое состояние тела. Согласно кинетической теории температуру определяют как меру кинетической энергии поступательного движения молекул. Отсюда температурой называют условную статистическую величину, прямо пропорциональную средней кинетической энергии молекул тела.

По принципу действия контактные средства измерения температуры можно разбить на четыре групп: термометры расширения, манометрические термометры, термопреобразователи сопротивления, термоэлектрические преобразователи.

Термометры расширения по устройству делятся на термометры линейного расширения (биметаллические и дилатометрические) и термометры жидкостные стеклянные объемного расширения. Принцип действия их основан на зависимости линейного (1) или объемного

расширения (2) от температуры. Уравнения номинальной статической характеристики (НСХ) термометров расширения:

$$l_t = l_0 (1 + \alpha t) \quad (1)$$

$$V_t = V_0 (1 + \beta_s t), \quad (2)$$

где l_0 - начальная длина чувствительного элемента (ЧЭ); V_0 - начальный объём термометрической жидкости; α , β - коэффициенты линейного расширения ЧЭ и объемного расширения жидкости соответственно.

Жидкостные термометры могут быть заполнены ртутью, спиртом метиловым, пентаном и выпускаются таких конструкций, как палочные, со вложенной шкалой, угловые, контактные и имеют рабочий диапазон от -200 до +800 °С. Основной недостаток – хрупкость, отсутствие возможности непрерывной передачи показаний на расстояние. Поверка жидкостных термометров выполняется методом сличения показаний с применением различных термостатов.

Термокомпенсаторы линейного расширения из-за низкой точности применяются как термореле в бытовых приборах (утюг, холодильник).

Принцип действия манометрических термометров основаны на зависимости давления рабочего (манометрического) вещества в замкнутом объеме (термосистеме) от температуры. Различают газовые, жидкостные и конденсационные (парожидкостные) манометрические термометры.

В зависимости от заполняющего вещества манометрические термометры делятся на газовые (термометр ТПГ, термометр ТДГ и др.), парожидкостные (термометр ТПП) и жидкостные (термометр ТПЖ, термометр ТДЖ и др.). Область измерения температур манометрическими термометрами колеблется в диапазоне от -60 до +600 °С.

Термобаллон манометрического термометра помещают в измеряемую среду. При нагреве термобаллона внутри замкнутого объема увеличивается давление, которое измеряется манометром. Шкала манометра градуируется в единицах температуры. Капилляр обычно представляет собой латунную трубку с внутренним диаметром в доли миллиметра. Это позволяет удалить манометр от места установки термобаллона на расстояние до 60 м. Капилляр по всей длине защищен оболочкой из стальной ленты.

Конденсационные термометры реализуют зависимость упругости насыщенных паров низкокипящей жидкости от температуры. Поскольку эти зависимости для используемых жидкостей (хлористый метил, этиловый эфир, хлористый этил, ацетон и др.) нелинейные, следовательно, и шкалы термометров неравномерны. Однако эти приборы обладают более высокой чувствительностью, чем, например, газовые жидкостные. В конденсационных термометрах измеряют давление насыщенного пара над поверхностью жидкости, неполно заполняющей термосистему, так как изменение давления происходит непропорционально – приборы имеют неравномерные шкалы. Пределы измерений от -25 до 300 °С.

Газовые манометрические термометры

В основу принципа действия газового термометра положена зависимость между температурой и давлением термометрического (рабочего) вещества, лишенного возможности свободно расширяться при нагревании. Газовые манометрические термометры основаны на зависимости температуры и давления газа, заключенного в герметически замкнутой термосистеме. В газовых термометрах (обычно постоянного объема) изменение температуры прямо пропорционально давлению в диапазоне измеряемых температур от -120 до 600°C . На измерении температуры газовыми термометрами построены современные температурные шкалы. Процесс измерения заключается в приведении баллона с газом в состояние теплового равновесия с теплом объекта, температуру которого измеряют, и в восстановлении первоначального объема газа. Газовый термометр высокой точности – довольно сложное устройство. Необходимо учитывать не идеальность газа, тепловое расширение баллона и соединительной трубки, изменение состава газа внутри баллона (сорбцию и диффузию газов), изменение температуры вдоль соединительной трубки. Достоинства: шкала прибора практически равномерна. Недостатки: сравнительно большая инерционность и большие размеры термобаллона.

Спиртовые манометрические термометры

Термометр спиртовой относится к термометрам расширения и является подвидом жидкостного термометра. Принцип действия термометра спиртового основан на изменении объема жидкостей и твердых тел при измерении температуры. Таким образом, в данном термометре используется способность жидкости, заключенной в стеклянную колбочку, к расширению и сжатию. Обычно стеклянная капиллярная трубочка заканчивается шаровидным расширением, которое служит резервуаром для жидкости. Чувствительность такого термометра находится в обратной зависимости от площади поперечного сечения капилляра и в прямой – от объема резервуара и от разности коэффициентов расширения данной жидкости и стекла. Поэтому чувствительные термометры имеют большие резервуары и тонкие трубки, а используемые в них жидкости с увеличением температуры расширяются значительно быстрее, чем стекло. Этиловый спирт применяют в термометрах, предназначенных для измерения низких температур. Точность проверенного стандартного стеклянного спиртового термометра $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$. Главная причина погрешности связана с постепенными необратимыми изменениями упругих свойств стекла. Они приводят к уменьшению объема стекла и повышению точки отсчета. Кроме того, ошибки могут возникать в результате неправильного считывания показаний или из-за размещения термометра в месте, где температура не соответствует истинной температуре воздуха. Дополнительные ошибки могут возникать из-за сил сцепления между спиртом и стеклянными стенками трубки, поэтому при быстром понижении температуры часть жидкости удерживается на стенках. Кроме того, спирт на свету уменьшает свой объем.

Благодаря широкому диапазону рабочих температур манометрические термометры широко применяются в промышленности холодильного оборудования, машиностроения, пищевой промышленности, а также манометрические термометры нашли применение на железнодорожном транспорте (например, в пассажирском вагоне для контроля температуры воды в системе отопления, на электровазоне для контроля нагрева масла трансформатора). Конденсационные термометры реализуют зависимость упругости насыщенных паров низкокипящей жидкости от температуры. Поскольку эти зависимости для используемых жидкостей (хлористый метил, этиловый эфир, хлористый этил, ацетон и др.) нелинейные, следовательно, и шкалы термометров неравномерны. Однако эти приборы обладают более высокой чувствительностью, чем, например, газовые жидкостные. В конденсационных термометрах измеряют давление насыщенного пара над поверхностью жидкости, неполно заполняющей термосистему, так как изменение давления происходит непропорционально – приборы имеют неравномерные шкалы. Пределы измерений от -25 до 300°C.

Термопреобразователь сопротивления или термометр сопротивления (ТС) – средство измерения температуры, состоящее из одного или нескольких термочувствительных элементов сопротивления и внутренних соединительных проводов, помещенных в герметичный защитный корпус, внешних клемм или выводов, предназначенных для подключения к измерительному прибору (рисунок 1).

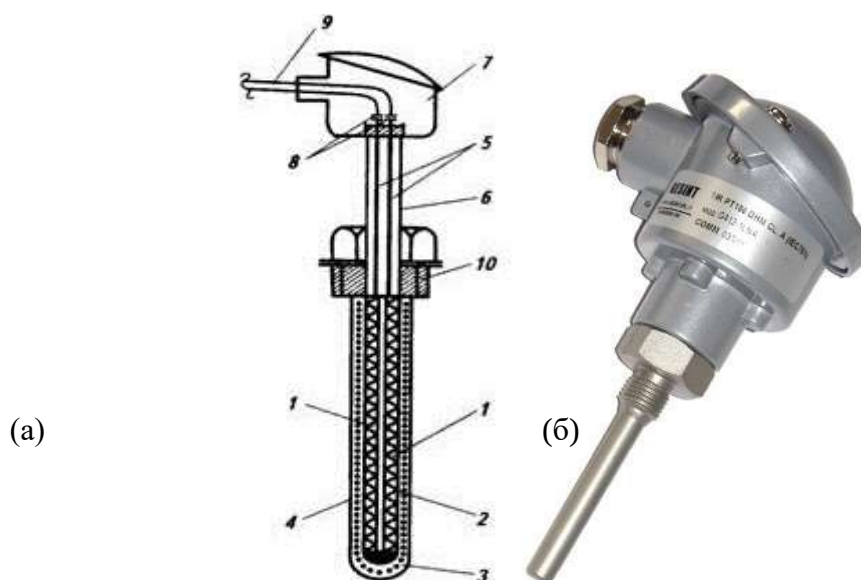


Рисунок 1 - Термометр сопротивления

а) разрез; б) внешний вид

1 - чувствительный элемент из платиновой или медной проволоки, в форме спирали, расположенный на керамическом стержне; 2 - пористый керамический цилиндр; 3 - керамический порошок; 4 - защитная наружная трубка из нержавеющей стали; 5 - токопередающие выводы; 6 - наружная защитная трубка из нержавеющей стали; 7 - головка термометра со съемной крышкой; 8 - клеммы для присоединения выводного

провода; 9 - провод к фиксирующему прибору; 10 - втулка с резьбой для установки в трубопровод, имеющий патрубки с внутренней резьбой.

Принцип действия термометров сопротивления основан на зависимости электрического сопротивления чистых металлов и полупроводников от температуры (на увеличении сопротивления R с повышением температуры у металлов и обратная зависимость R от T у полупроводников).

Термометры сопротивления отличаются друг от друга своей номинальной статической характеристикой—зависимостью сопротивления чувствительного элемента ТС от температуры: $R_t = f(t)$.

При анализе термометров сопротивления важным понятием является номинальная статическая характеристика (НСХ), связывающая сопротивление термометра и значение измеряемой температуры. Ниже приведены формулы для расчета НСХ:

1. Платиновые ТС и ЧЭ, $\alpha = 0,00385^\circ\text{C}^{-1}$.

Для диапазона измерений от -200 до 0°C :

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100^\circ\text{C})t^3]. \quad (3)$$

Для диапазона измерений от 0 до 850°C :

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2], \quad (4)$$

где R_t – сопротивление ТС, Ом, при температуре t , $^\circ\text{C}$; R_0 —номинальное сопротивление ТС, Ом, при температуре 0°C .

Значения постоянных следующие:

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1};$$

$$B = -5,775 \cdot 10^{-7}^\circ\text{C}^{-2};$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12}^\circ\text{C}^{-4}.$$

2. Платиновые ТС и ЧЭ, $\alpha = 0,00391^\circ\text{C}^{-1}$.

Для диапазона измерений от -200 до 0°C :

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100^\circ\text{C})t^3]. \quad (5)$$

Для диапазона измерений от 0 до 850°C :

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2], \quad (6)$$

где R_t – сопротивление ТС, Ом, при температуре t , $^\circ\text{C}$; R_0 —номинальное сопротивление ТС, Ом, при температуре 0°C .

Значения постоянных следующие:

$$\begin{aligned} A &= 3,9690 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}; \\ B &= -5,841 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}; \\ C &= -4,330 \cdot 10^{-12} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-4}. \end{aligned}$$

3. Медные ТС и ЧЭ, $\alpha = 0,00428 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Для диапазона измерений от -180 до 0°C :

$$R_t = R_0[1 + At + Bt(t + 6,7^{\circ}\text{C}) + Ct^3]. \quad (7)$$

Для диапазона измерений от 0 до 200°C :

$$R_t = R_0[1 + At], \quad (8)$$

где R_t – сопротивление ТС, Ом, при температуре t , $^{\circ}\text{C}$; R_0 – номинальное сопротивление ТС, Ом, при температуре 0°C .

Значения постоянных следующие:

$$\begin{aligned} A &= 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}; \\ B &= -6,2032 \cdot 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}; \\ C &= 8,5154 \cdot 10^{-10} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-3}. \end{aligned}$$

4. Никелевые ТС и ЧЭ, $\alpha = 0,00617 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Для диапазона измерений от -60 до $+100^{\circ}\text{C}$:

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2]. \quad (9)$$

Для диапазона измерений от 100 до 180°C :

$$R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + C(t - 100^{\circ}\text{C})t^2], \quad (10)$$

где R_t – сопротивление ТС, Ом, при температуре t , $^{\circ}\text{C}$; R_0 – номинальное сопротивление ТС, Ом, при температуре 0°C .

Значения постоянных следующие:

$$\begin{aligned} A &= 5,4963 \cdot 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}; \\ B &= 6,7756 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-2}; \\ C &= 9,2004 \cdot 10^{-9} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-3}. \end{aligned}$$

Типы термометров сопротивления идентифицируются по сопротивлению при 0°C (таблица 3).

Таблица 3

Типы термометров сопротивления

Тип ТС	Наименование	R_0 , Ом	Обозначение
--------	--------------	------------	-------------

			НСХ
TСМ	Термометр сопротивления медный	50 100	50М (Cu 50) 100М
TСП	Термометр сопротивления платиновый	1 5 10 50 100 500	1П 5П 10П 50П 100П (Pt100) 500П
TСН	Термометр сопротивления никелевый	60 100 1000	60Н 100Н 1000Н

Термоэлектрические преобразователи температуры или термопары (ТП) – это контактные датчики температуры, состоящие из двух металлических проводников, сваренных одним концом (рисунок 2). Сварной конец называется рабочим (горячим, измерительным) концом термопары, противоположные концы – свободными (холодными, соединительными) концами.

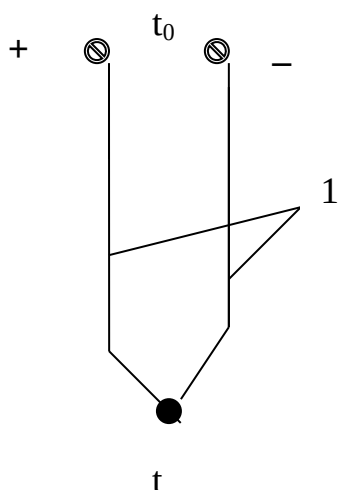


Рисунок 2 - Термоэлектрический преобразователь температуры (термопара)

1 – разнородные по электропроводности термоэлектроды из металлов или сплавов в керамической или пластиковой электроизоляции

Принцип действия термопары основан на явлении термоэффекта Зеебека и Пельтье [6], который возникает в спае различных проводников в виде контактной разности потенциалов (термоЭДС), которая зависит от температуры.

НСХ термопары – это зависимость термоЭДС термопары от температуры измерительного и соединительного концов термопары, она равна разности термоЭДС, взятых для температуры измерительного (t) и соединительного (t_0) концов:

$$E(t, t_0) = E(t) - E(t_0) \quad (11)$$

Типы стандартных термопар представлены в таблице 4.

Таблица 4

Типы стандартных термопар

Материал термоэлектродов	Тип ТП	Обозначение НСХ	Диапазон измерений	
			от	до
Медь/копель	ТМК	М	-200	+100
Медь/ константан	ТМК _н	Т	-200	+400
Железо/медноникель	ТЖК _н	Ј	-200	+700
Хромель-копель	ТХК	Л	-200	+ 800
Хромель – алюмель	ТХА	К	-200	+1000
Хромель – константан	ТХК _н	Е	-200	+1000
Нихросил / нисил	ТНН	Н	-200	+1300
Платина- родий (13%) - платина	ТПП 13	R	0	+1700
Платина- родий (10%) - платина	ТПП 10	S	0	+1700
Платина –родий (30%)/ платина- родий(6%)	ТПР	В	0	+1800
(Вольфрам — рений/вольфрам — рений)	ТВР	А-1	0	+2500
		А-2	0	+1800
		А-3	0	+1800

Особенности термопар:

- широкий диапазон измеряемых температур;
- в бесчехольном исполнении позволяют измерять температуру в точке среды или объекта с очень малым временем реакции;
- требуют внесения поправки на температуру свободных концов.

Конструктивные формы термопар разнообразны и зависят от назначения:

- погружаемые термопары;
- термопары с унифицированным выходным сигналом (рис.2а);
- термопары для измерения температуры поверхности неподвижных и вращающихся тел;
- кабельные термопары, предназначенные для измерения температур в труднодоступных местах;
- многозонные термопары.

Задание 1.

Найти термоЭДС термопары ТХК(Л) для температуры горячего конца в соответствии с вариантом задания и температурой свободных концов $t_0 = 20^\circ\text{C}$ (таблица 5) в соответствии с ГОСТ Р 8.585-2001 [5] и приложением А. Номер является вариантом задания.

Таблица 5

Варианты задания для выбора термопары

№	Температура Измерительного конца термопары	Тип и НСХ ТЭП	№	Температура Измерительного конца термопары	Тип и НСХ ТЭП
1	2	3	4	5	6
1	220	ТХК (L)	10	+100	К
2	230	ТМК _Н (Т)	11	+400	Е
3	240	ТЖК _Н (J)	12	+700	ТХА
4	250	К	13	+ 800	ТХК _Н
5	260	Е	14	+1000	ТНН
6	270	N	15	+1000	ТПП 13
7	280	R	16	+1300	ТПП 10
8	290	S	17	+1700	ТПР
9	300	B	18	-200	ТМК (М)

Задание 2.

Построить график НСХ указанных в таблице 5 термопар в рабочем диапазоне температур, используя Microsoft Excel, определить их чувствительность.

Задание 3.

Рассчитать относительное сопротивление и температурный коэффициент сопротивления α (альфа) для ТСМ НСХ 50М согласно таблице 6. Номер является вариантом задания.

Таблица 6

Зависимость сопротивления от температуры для медных термометров
сопротивления НСХ 50М

№	Температура, °C	Сопротивлени е, Ом	№	Температура, °C	Сопротивлени е, Ом
1	-50	39,24	14	80	67,12
2	-40	41,40	15	90	69,26
3	-30	43,56	16	100	71,40
4	-20	45,71	17	110	73,54
5	-10	47,86	18	120	75,68
6	0	50	19	130	77,82
7	10	52,14	20	140	79,95
8	20	54,28	21	150	82,09
9	30	56,42	22	160	84,23
10	40	58,56	23	170	86,37

11	50	60,70	24	180	90,65
12	60	62,84	25	190	90,65
13	70	64,98	26	200	92,79

Контрольные вопросы

1. Сформулировать принцип действия термометра сопротивления.
2. Что такое W_{100} для термометров сопротивления?
3. Чему равно относительное сопротивление термометра ТСХ 50М?
4. Какие типы термометров сопротивления выпускаются серийно?
5. Как представляется уравнение ТСХ ТСМ?
6. Сформулировать принцип действия термопары.
7. Чему равна термоЭДС термопары?
8. Какие металлы и сплавы применяются для ТП ТХК (L)?

Литература

1. [5]
2. [6]
3. [26]

2.3. Практическое занятие 4. Бесконтактные средства контроля температуры

Содержание занятия: классификация, назначение и принцип действия оптических бесконтактных термометров и тепловизоров.

Основной материал:

Оптические пирометры – это бесконтактные средства измерения температуры. По принципу действия их можно разделить на:

- пирометры полного излучения (радиационные);
- пирометры частичного излучения (монохроматические);
- пирометры спектральных отношений (цветовые);
- пирометры инфракрасного излучения (ИК-пирометры).

Нагретым телом выделяется лучистая энергия в виде электромагнитных волн различной длины: при низких температурах тела (до 500°С) это инфракрасное излучение, при более высоких температурах – красное, темно-красное и белое излучение, возрастает спектральная энергетическая яркость (СЭЯ).

Диапазон измерения оптических пирометров очень широкий, от 0 до 10 000 градусов по шкале Цельсия. Устройство пирометров соответствует их принципу действия, но общий элемент для всех типов – это оптическая система, состоящая из линзы объектива, линзы окуляра, светофильтров (рисунок 9).

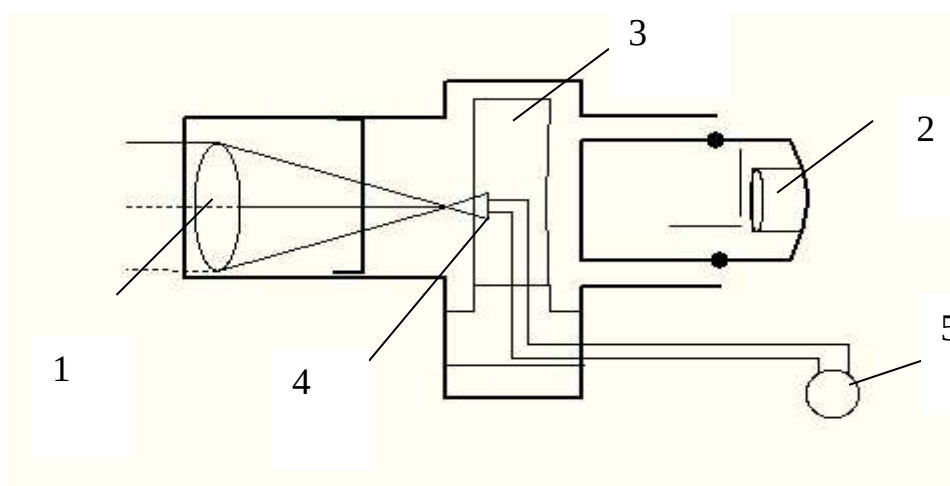


Рисунок 9. Принципиальная схема радиационного оптического пирометра

1 – объектив; 2 окуляр; 3 – теплоприемник; 4 – батарея термопар; 5 – измерительный прибор

Уравнения измерения (НСХ) пирометров соответствуют законам физики оптики:

- для пирометров полного излучения (рисунок 10) это уравнение Стефана-Больцмана, связывающего интенсивность (яркость) полного излучения (излучения, состоящего из волн всех длин- белый свет) с яркостной температурой тела:

$$E = \sigma T^4, \quad (12)$$

где σ – постоянная Больцмана.

Достоинства оптических пирометров заключаются в их бесконтактном способе измерения и удовлетворительных метрологических характеристиках. Так, радиационный ИК – термометр Sight фирмы Optris (Германия) в диапазоне от 0 до 100 °С имеет основную допускаемую погрешность $\pm 1^\circ\text{C}$.

Недостатком оптических пирометров являются ограничения по температуре окружающего воздуха (0..+50)°С и влияние пыли и паров на точность измерения.

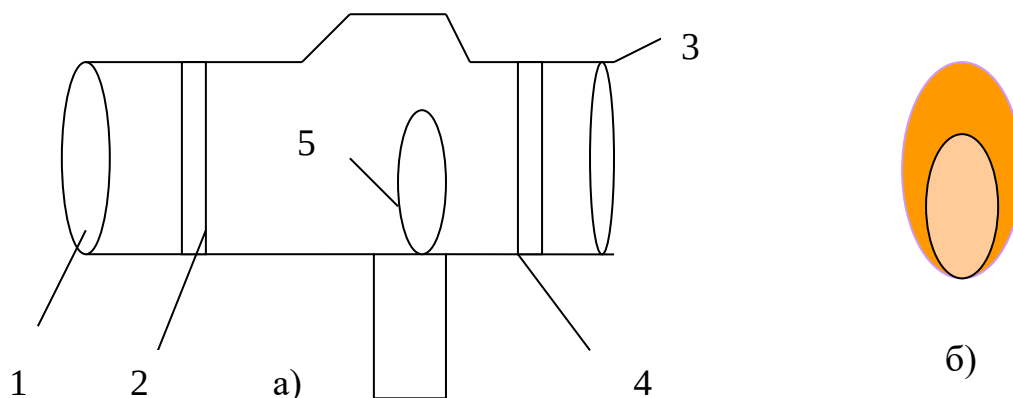


Рисунок 10. Принципиальная схема квазимонохроматического пирометра
 а) устройство; б) изображение нити температурной лампы на фоне раскаленного тела.
 1- линза объектива; 2 – серый светофильтр, вводится для увеличения диапазона измерения; 3 - окуляр; 4 – красный светофильтр, служит для выделения участка спектра с излучением определенной длины волны (0, 65мкм); 5 – температурная лампа.

В пирометрах частичного излучения изменение спектральной энергетической яркости описывается уравнением Вина, связывающего интенсивность монохроматического излучения (излучения определенной длины волны) с измеряемой температурой тела:

$$E_{\lambda} = C_1 \epsilon \lambda^{-5} \exp (- C_2 / \lambda T), \quad (13)$$

где $C_1 = 2nhc^2$; $C_2 = Nhc/R$ - постоянные коэффициенты, физические константы; E_0 – интенсивность излучения абсолютно черного тела; ϵ – степень черноты; λ – длина волны (красный свет, $\lambda = 0,65$ нм); T – измеряемая температура.

Для цветowych пирометров справедлив закон смещения Вина, утверждающий то, что с увеличением температуры тела максимум излучения смещается в сторону более коротких длин волн:

$$\lambda_{max} T = b, \quad (14)$$

где $b = 2896$ мкм.

Влияние окружающей среды на показания пирометра (запыленность, наличие паров) исключается, т.к. в уравнении измерения используется зависимость отношения интенсивностей излучения двух определенных длин волн (синий и красный свет) от температуры тела:

$$E_{\lambda 1} / E_{\lambda 2} = f(1/T) \quad (15)$$

$$1/T = 1/T_c - \ln(\epsilon'_{\lambda 1} / \epsilon'_{\lambda 2}) / (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2), \quad (16)$$

где T_c – цветовая температура реального тела; T – измеряемая температура.

Задание 1.

Дать описание закона физики оптики, лежащего в основе принципа действия бесконтактного термометра, указанного в таблице 7.

Таблица 7

Варианты заданий по выбору бесконтактных термометров

№	Принцип действия и диапазон температур	№	Принцип действия и диапазон температур
1	радиационный	11	Полного излучения
2	Цветовой	12	тепловизор
3	ИК -термометр	13	Частичного излучения
4	Полного излучения	14	Спектральных отношений
5	тепловизор	15	Полного излучения
6	Частичного излучения		
7	Спектральных отношений		
8	Полного излучения		
9	монохроматического излучения		
10	Термометр закона Вина		

Контрольные вопросы

1. Сформулировать принцип действия оптического пирометра
2. Что такое яркостная температура?
3. Чему равна степень черноты абсолютно черного тела?
4. Какие типы инфракрасных термометров выпускаются серийно?
5. Уравнение НСХ пирометра частичного монохроматического излучения

Литература

1. [26]

2.4. Практическое занятие 5. Средства контроля давления

Содержание занятия: Виды, единицы измерения давления. Приборы и преобразователи давления

Основной материал:

Давление – это величина, равная отношению силы, действующей перпендикулярно поверхности к площади этой поверхности:

$$P = F/S, \text{ Па} \quad (17)$$

Производная единица давления в СИ – Паскаль. $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$. Кратные Паскалю единицы – килоПаскаль ($1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$) и мегаПаскаль ($1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$).

Различают следующие виды давлений (рисунок 11):

- атмосферное (барометрическое) $P_{\text{б}}$,
- избыточное(манометрическое) $P_{\text{и}}$,
- вакуумметрическое (избыточное давление отрицательно) $P_{\text{в}}$,
- абсолютное(полное, сумма атмосферного и избыточного давления) $P_{\text{а}}$,
- дифференциальное $\Delta P = P_{\text{и1}} - P_{\text{и2}}$ - перепад давления.

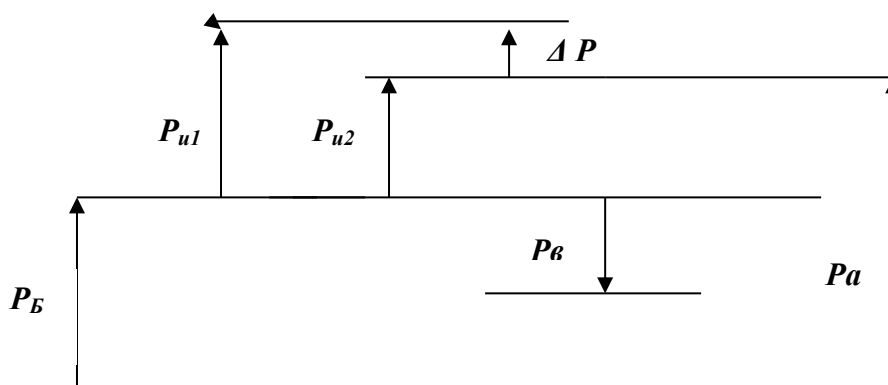


Рисунок 11 - Диаграмма соотношения величин давления

В соответствии с диаграммой (рисунок 11) приборы и измерительные преобразователи давления (ИПД) по назначению классифицируются на:

- барометры для измерения барометрического давления $P_{\text{б}}$;
- манометры для измерения избыточного давления $P_{\text{и}}$;
- вакуумметры для измерения давления разрежения $P_{\text{в}}$;
- дифманометры для измерения разности давлений $P_{\text{и1}} - P_{\text{и2}}$;
- манометры абсолютного давления $P_{\text{а}}$;
- тягомеры для измерения малого давления разрежения $P_{\text{в}}$;
- напорометры для измерения малого избыточного давления $P_{\text{и}}$.

По принципу действия приборы и измерительные преобразователи давления делятся на три четыре группы:

1. Жидкостные приборы давления;

2. Деформационные приборы и измерительные преобразователи давления;
3. Грузопоршневые манометры;
4. Электрофизические измерительные преобразователи давления.

В жидкостных приборах давления измеряемое давление уравнивается гидростатическим давлением столба жидкости, в качестве которой используется ртуть, вода, минеральные масла. Уравнение измерения основано на зависимости высоты столба жидкости (H) от величины измеряемого давления (P):

$$P = \rho \cdot g \cdot H, \quad (18)$$

где ρ , g - плотность жидкости и ускорение свободного падения.

Конструктивно жидкостные приборы давления делятся на U – образные, чашечные, с наклонной трубкой [12]. Жидкостные приборы давления, как правило, это лабораторные приборы. Для систем автоматизации эти средства технических измерений не пригодны, т.к. они не позволяют передавать показания. Их достоинством является высокая точность, простота устройства, возможность измерять микродавления.

Грузопоршневые манометры – это приборы прямого измерения давления. Они состоят из прессовой части и измерительной колонки. Применяются для поверки пружинных манометров.

Для технологических измерений в промышленных условиях в основном применяются деформационные приборы (рисунок 12) и измерительные преобразователи давления (ИПД).

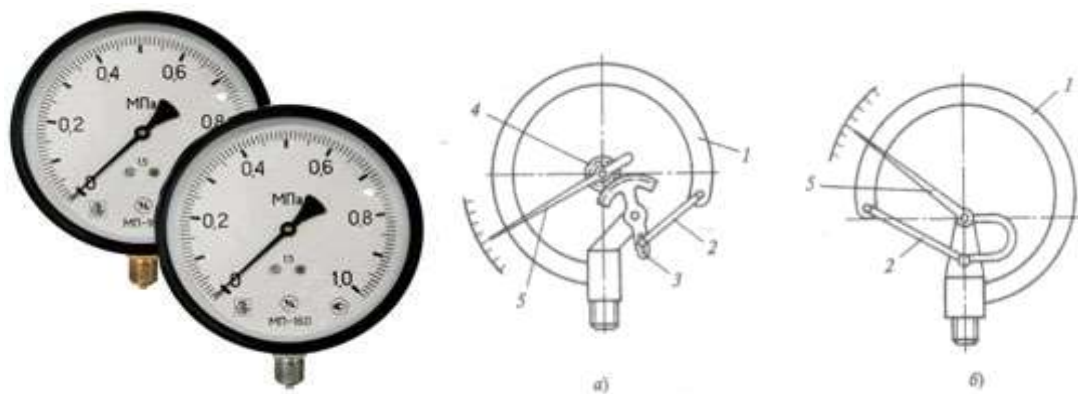


Рисунок 12 - Общий вид и принцип действия деформационных манометров

Перемещение свободного конца трубчатой пружины через тягу 2 передаётся зубчатому сектору 3, который посредством зубчатого зацепления приводит во вращение шестерню (трибку) 4 с закрепленной на ней стрелкой 5.

Уравнение измерения имеет вид:

$$P = k\xi, \quad (19)$$

где k - коэффициент, определяемый геометрией и материалом трубчатой пружины; ξ – величина перемещения свободного конца трубчатой пружины; P – измеряемое давление.

Принцип действия измерительного преобразователя давления основан на зависимости деформации чувствительного элемента от измеряемого давления и последующего преобразования этой деформации на основе тензоэффекта в полупроводниковом материале в электрический токовый сигнал (рисунок 13).

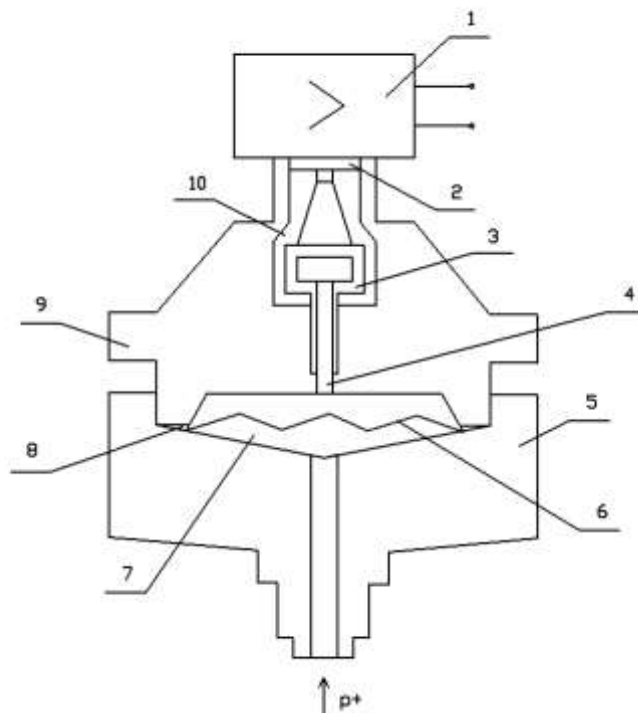


Рисунок 13 - Устройство измерительного преобразователя давления МЕТРАН-55М

1-электронный блок; 2- гермовыводы; 3 – монокристалл сапфира, покрытый кремниевой пленкой тензопреобразователя; 4-канал; 5 –фланец; 6 -титановая мембрана (ЧЭ); 7- измерительная камера; 8-прокладка; 9-основание; 10 –корпус

Чувствительный элемент (6) – титановая мембрана; выходной преобразователь - пластина монокристаллического сапфира с кремниевыми пленочными тензорезисторами. Тензорезисторы включены в мостовую измерительную схему.

Зависимость между выходным сигналом и измеряемым параметром определяется выражением:

$$I_p = \frac{P}{P_{\max}} (I_{\max} - I_{\min}) + I_{\min}, \quad (20)$$

где: I_p - расчетное значение выходного сигнала, соответствующее измеряемому давлению P ;

$I_{\max}$ - наибольшее предельное значение выходного сигнала, мА;

I_{min} - наименьшее предельное значение выходного сигнала, мА;

P - значение измеряемого давления или перепада давления в тех же единицах, что и P_{max} ;

P_{max} - верхний предел измерений измеряемого избыточного давления.

Задание 1.

Определить, какое давление измеряют следующие приборы давления, представленные в таблице 8.

Таблица 8

Варианты заданий по выбору приборов давления

№	Наименование прибора или измерительного преобразователя давления (ИПД)	№	Наименование прибора или измерительного преобразователя давления (ИПД)
1	Манометр трубчатый показывающий	8	Тягонапоромер
2	Барометр	9	Манометр гидростатического давления –уровнемер(ДГ)
3	Тягомер	10	TG
4	Вакууметр	11	CD
5	Дифманометр	12	ДД
6	Напоромер	13	ИПД МЕТРАН-55М
7	Манометр абсолютного давления	14	ИПД МЕТРАН-150
		15	ОБМ

Задание 2.

Назвать и записать размерность производных, кратных системных и внесистемных единиц давления.

Контрольные вопросы

1. В каких технологических процессах необходим контроль давления?
2. Какой чувствительный элемент в деформационном приборе давления?
3. Какое давление измеряется манометром?

Литература

1. [13].

2.5. Практическое занятие 6. Средства контроля уровня жидких и сыпучих сред

Содержание занятия: Уровнемеры жидких и сыпучих сред. Классификация. Обоснование выбора.

Основной материал:

В современных пищевых технологиях средства измерения уровня необходимы для предотвращения переливов аппаратов, а также для правильного дозирования компонентов в соответствии с рецептурой и уравнениями материальных балансов. По принципу действия уровнемеры можно разбить на две категории: контактные и бесконтактные (рисунок 14, таблица 9).

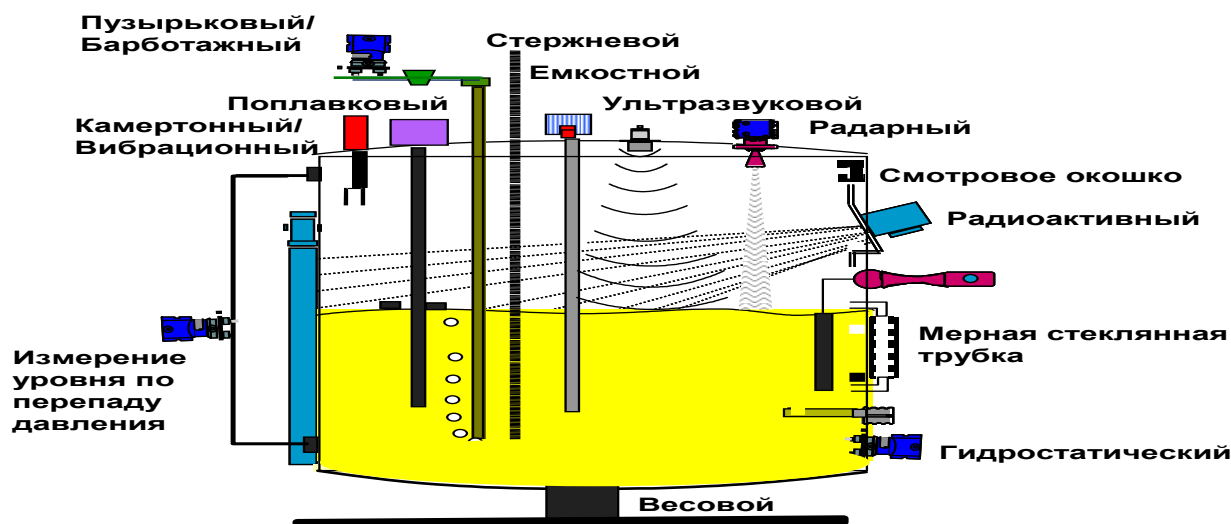


Рисунок 14 - Типы уровнемеров

Таблица 9

Классификация уровнемеров

Контактные уровнемеры		Бесконтактные уровнемеры	
№ п/п	Наименование	№ п/п	Наименование
1	Кондуктометрические сигнализаторы уровня	1	Радарные уровнемеры
2	Гидростатические пьезометрические уровнемеры	2	Ультразвуковые уровнемеры
3	Гидростатические дифманометрические уровнемеры	3	Акустические уровнемеры
4	Уровнемерные стекла	4	Радиоизотопные уровнемеры
5	Волноводные уровнемеры	5	Оптические уровнемеры
6	Емкостные сигнализаторы	6	Весовые сигнализаторы уровня
7	Вибрационные сигнализаторы уровня		

8	Поплавковые/буйковые уровнемеры		
---	------------------------------------	--	--

Для измерения уровня жидких сред в производстве пищевых продуктов наиболее применимы гидростатические пьезометрические, электрические, волноводные радарные и ультразвуковые уровнемеры.

Принцип действия гидростатических уровнемеров основан на зависимости гидростатического давления столба жидкости от уровня по уравнению:

$$P = \rho g L, \quad (21)$$

где ρ - плотность измеряемой среды, g - ускорение свободного падения в данной местности, L – измеряемая величина (уровень в мм или %).

Основным измерителем в схеме гидростатического уровнемера является измерительный преобразователь давления или дифманометр.

Гидростатический пьезометрический (барботажный) уровнемер содержит кроме манометра пьезотрубку, помещенную в аппарат, через которую непрерывно продувается воздух или азот. При минимальном уровне воздух легко барботирует и на манометр поступает минимальное давление. При увеличении уровня барботаж затрудняется и часть воздуха отводится на манометр, давление в котором растет. Барботажные уровнемеры применяются только для аппаратов открытого типа (под атмосферным давлением). Датчики гидростатического давления (уровня) Метран-100-ДГ и датчики разности давлений Метран-100-ДД, используемые для измерения уровня, измеряют гидростатическое давление столба жидкости и обеспечивают непрерывное преобразование значения этого давления в унифицированный токовый сигнал и/или цифровой сигнал по HART-протоколу.

Принцип действия электрических уровнемеров основан на зависимости электрических параметров схемы от уровня среды. В зависимости от измеряемого параметра - сопротивления, индуктивности, емкости или диэлектрической проницаемости, электрические уровнемеры разделяются на кондуктометрические, индуктивные и емкостные приборы.

Принцип действия прибора САУ-М6 при работе в системе автоматического поддержания уровня основан на использовании токопроводящих свойств жидкости для замыкания или размыкания электрической цепи при изменении уровня этой жидкости относительно электродов, установленных на определенных высотах в резервуаре (рисунок 15).

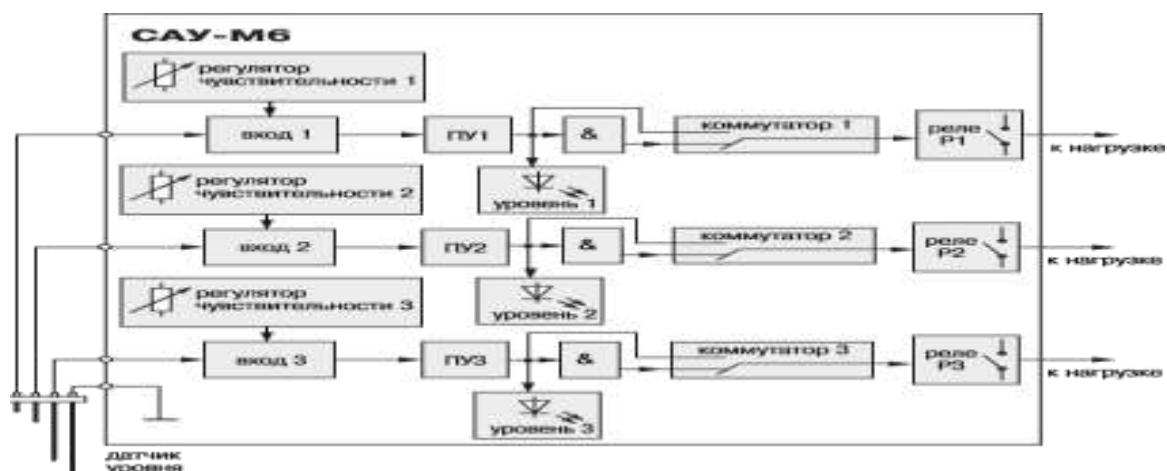


Рисунок 15 - Структурная схема кондуктометрического уровнемера

Электронный восьмиканальный уровнемер ИСУ-2000И (измеритель-сигнализатор уровня емкостной) в комплекте с датчиками уровня (до 8 шт.) предназначен для непрерывного измерения восьми уровней жидких (нефти, нефтепродуктов, воды, щелочей, кислот, масла, пищевых жидкостей и др.) или сыпучих (цемента, извести, песка, щебня, руды, шихты, угля, гранулированного порошка и др.) сред, электропроводных и диэлектриков, преобразования измеренного значения в унифицированный токовый выходной сигнал, контроля (сигнализации) заданных предельных положений измеряемого уровня в группе емкостей (по две уставки в каждой емкости), а также для передачи измерительной информации другим устройствам систем автоматизированного управления (САУ) посредством интерфейса RS485.

Принцип действия волноводных радарных уровнемеров Rosemount 5300 основан на технологии рефлектометрии с временным разрешением (TDR = TimeDomainReflectometry (рисунок 16)). Микроволновые наносекундные радарные импульсы малой мощности направляются вниз по зонду, погруженному в технологическую среду. Когда радарный импульс достигает среды с другим коэффициентом диэлектрической проницаемости, часть энергии импульса отражается в обратном направлении. Разница во времени между моментом передачи радарного импульса и моментом приема эхо-сигнала пропорциональна расстоянию, согласно которому рассчитывается уровень жидкости или уровень границы раздела двух сред. Измеряемые среды: жидкие (нефть, темные и светлые нефтепродукты, вода, сжиженные газы, кислоты и др.), сыпучие (пластик, зольная пыль, цемент, песок, сахар, злаки и др.).

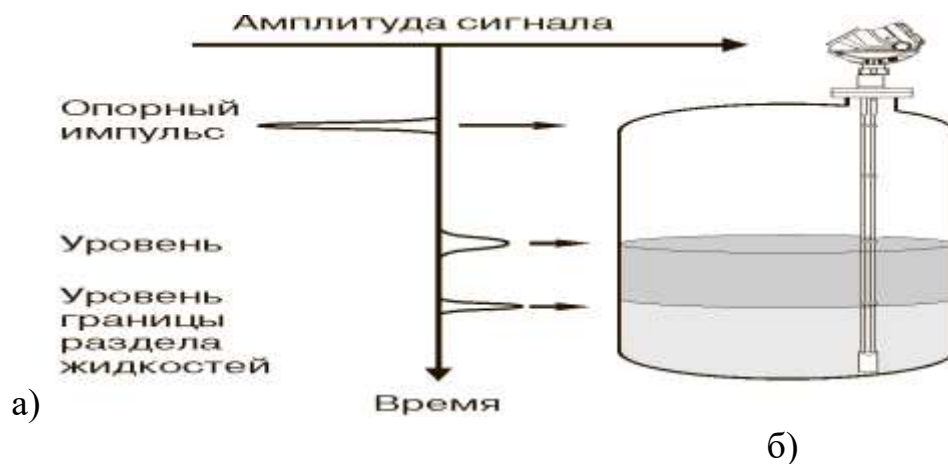


Рисунок 16 - Волноводный уровнемер

а) график прохождения сигнала по волноводу: б) схема монтажа уровнемера

Бесконтактные радарные и ультразвуковые уровнемеры не контактируют с измеряемой средой, а с помощью электромагнитного излучения определенной длины волны зондируют измеряемое пространство. Принцип действия их основан на зависимости времени прохождения сигнала до границы раздела фаз от уровня (рисунок 17).

Уровнемер 5400 состоит из блока электроники, присоединения к резервуару и антенны. Присоединение к резервуару и антенна являются единственными деталями, которые контактируют с атмосферой резервуара.

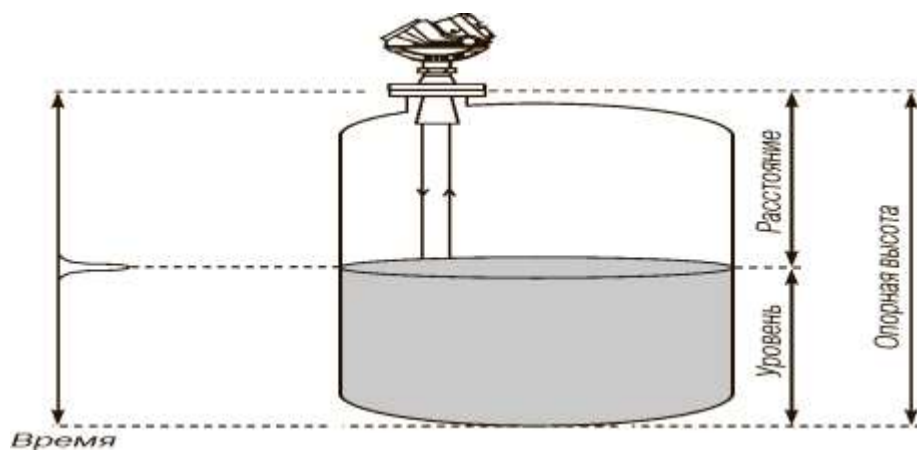


Рисунок 17 - Принцип действия радарного уровнемера

Задание 1.

Выбрать и описать принцип действия, устройство, метрологические характеристики и уравнение, описывающее принцип действия уровнемера, для следующих продуктов, в соответствии с вариантом задания (таблица 10).

Таблица 10

Варианты задания по выбору приборов уровня

№	Наименование продукта	№	Наименование продукта
---	-----------------------	---	-----------------------

1	Мука	6	Масло подсолнечное
2	Зерно	7	Пиво
3	Вода	8	Дрожжевое сусло
4	Молоко	9	Кислота уксусная
5	Масло оливковое	10	Раздел фаз

Контрольные вопросы

1. Какие уровнемеры являются бесконтактными?
2. Принцип действия и область применения контактного кондуктометрического уровнемера
3. Что является постоянной величиной в уравнении измерения гидростатического уровнемера?

Литература

1. [11].
2. [21].

2.6. Практическое занятие 7. Расходомеры переменного перепада давления с СУ и ОНТ

Содержание занятия: определения, единицы измерения, устройство измерительных преобразователей объемного расхода

Основной материал:

Одним из информативных технологических параметров является *расход* и *количество* сырья или продукта. В процессе производства и потребления измерение этих параметров необходимо как для контроля экономических показателей, так и для управления самими процессами.

Современные средства измерения расхода и количества жидкостей и газов разнообразны по принципу действия, метрологическим характеристикам, условиям эксплуатации и методам поверки. Знание особенностей каждого типа расходомеров, его достоинств и недостатков позволяют обеспечить единство измерений и избежать потерь из-за неточных измерений и низкой метрологической надёжности средств измерений.

Следует также различать при выборе того или иного расходомера его *стоимость приобретения* (покупки) и *стоимость владения*, куда входят затраты на обслуживание и ремонты, демонтаж и монтаж и поверку. Так, являясь самым дешевым дроссельный расходомер (с диафрагмой) требует ежегодной поверки, демонтажа, монтажа и расчета СУ.

Расход – это объем или масса вещества, проходящие в единицу времени через поперечное сечение трубопровода.

Различают расход объемный (g_o) и массовый (g_m):

$$g_o = us, \text{ м}^3 / \text{с} \quad (22)$$

$$g_m = g_o \rho, \text{ кг} / \text{с} \quad (23)$$

где s — площадь сечения трубопровода, u — скорость потока, ρ — плотность вещества.

Количество вещества выражают в единицах объема или массы за длительный промежуток времени.

Количество жидкости с равной степенью точности можно измерять объемным и массовым методами, так как плотность жидкости при определенной температуре является величиной постоянной для данной жидкости. При переходе от объемных единиц к массовым необходимо учитывать температуру измеряемой жидкости, так как плотность веществ зависит от температуры.

Зависимость плотности жидкости от температуры приближенно выражается формулой

$$\rho_t = \rho_{20} / (1 - \beta(20 - t)), \quad (24)$$

где ρ_{20} — плотность жидкости при температуре 20°C; β — температурный коэффициент объемного расширения жидкости, 1/°C; t — температура жидкости, °C.

Значения плотности воды и других жидкостей в зависимости от температуры приведены в справочной литературе [7].

Средства измерения расхода называются расходомерами

По принципу действия и методу измерения расхода расходомеры можно разделить на несколько групп:

1. Расходомеры переменного перепада давления, измеряющие расход по перепаду давления в местах сужения потока измеряемой среды.
2. Расходомеры переменного перепада давления с осредняющей напорной трубкой (ОНТ) (AnnuBar).
3. Расходомеры постоянного перепада давления (ротаметры), мерой расхода в которых является высота положения поплавка-ротора;
4. Электромагнитные (индукционные) расходомеры, измеряющие расход по ЭДС, индуцируемой в потоке электропроводной жидкости, пересекающей магнитное поле.
5. Ультразвуковые расходомеры, измеряющие расход по смещению ультразвуковых колебаний движущейся средой.
6. Вихревые и вихреакустические расходомеры, основанные на явлении образования вихрей после тела обтекания, помещенного в трубопровод.
7. Кориолисовые расходомеры (массомеры), измерение в которых основано на зависимости сил Кориолиса от величины массового расхода. Силы Кориолиса вызывают сдвиг фаз между сигналами детекторов, расположенных на входе и выходе расходомерной трубки.

8. Расходомеры переменного уровня, измеряющие расход в безнапорных трубопроводах по изменению уровня в мерных камерах.
9. Тепловые, измеряющие расход на основе зависимости процесса теплообмена от скорости потока среды.
10. Корреляционные расходомеры, основанные на зависимости времени транспортного запаздывания прохождения турбулентных флуктуаций потока расстояния между двумя парами ультразвуковых преобразователей от объемного расхода.
11. Скоростные (тахометрические) расходомеры, основанные на зависимости скорости вращения чувствительного элемента (турбинки, шарика) от расхода среды.
12. Струйные (автогенераторные) расходомеры, основанные на зависимости частоты автоколебаний струйного генератора от величины объемного расхода.

Расходомеры переменного перепада давления

Принцип действия основан на зависимости разности давлений до и после сужающего устройства (СУ) от объемного расхода g_o . Измерение расхода по этому методу основано на изменении потенциальной энергии (статического давления) вещества, протекающего через местное сужение в трубопроводе. Сужающее устройство (диафрагма) (рисунок 18) представляет собой тонкий стальной диск, установленный в трубопроводе так, чтобы отверстие в диске было концентрично сечению трубопровода. Сужение потока начинается до диафрагмы; затем на некотором расстоянии за ней благодаря действию сил инерции поток сужается до минимального сечения (диаметр d_2), а далее постепенно расширяется до полного сечения трубопровода. Перед диафрагмой и за ней образуются зоны с вихревым движением, причем зона вихрей за диафрагмой больше, чем перед ней.

Давление потока около стенки трубопровода несколько возрастает из-за подпора перед диафрагмой и снижается до минимума за диафрагмой в наиболее узком сечении потока. Далее, по мере расширения струи, давление потока около стенки снова повышается, но не достигает прежнего значения. Потеря части давления p_n определяется, главным образом, потерей энергии на трение и завихрения.

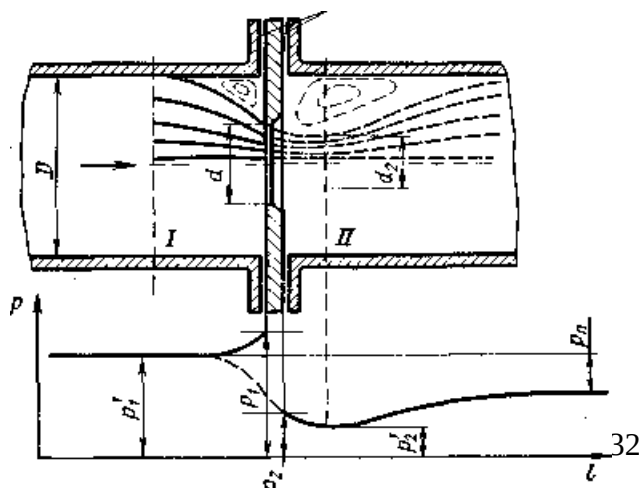


Рисунок 18 - Эпюра потока и график распределения статического давления при установке сужающего устройства в трубопроводе

I – сечение потока на расстоянии L_1 от СУ;
II – сечение потока в месте наибольшего сужения потока; *III*, *IV* – сечения потока до и после СУ

L – длина трубопровода; P_1 – давление в трубопроводе до СУ (сечение *III*);
 P_2 – давление после СУ (сечение *IV*); P_2' – давление в наибольшем сужении потока, минимальное давление (сечение *II*);
 P_n – потери напора на трение и завихрения потока.

Уравнение расхода принимает вид:

$$q_m = CE\varepsilon(\pi d^2 / 4)(2\rho\Delta p)^{1/2}. \quad (25)$$

где E – коэффициент скорости, равный:

$$E = 1/[1 - (u_D / u_d)^2]^{1/2} = 1/[1 - (d / D)^4]^{1/2} = 1/(1 - \beta^4)^{1/2}; \quad (26)$$

$\Delta p = (p_1 - p_2)$ – перепад давления на СУ,

где $\beta = d/D$ – относительный диаметр отверстия СУ (β), равен отношению диаметра отверстия (или горловины) СУ (d) к внутреннему диаметру ИТ перед СУ (D) при рабочей температуре среды.

Диафрагма (рисунок 19, 20, 21) представляет собой тонкий стальной диск, установленный в трубопроводе так, чтобы отверстие в диске было концентрично внутреннему контуру сечения трубопровода

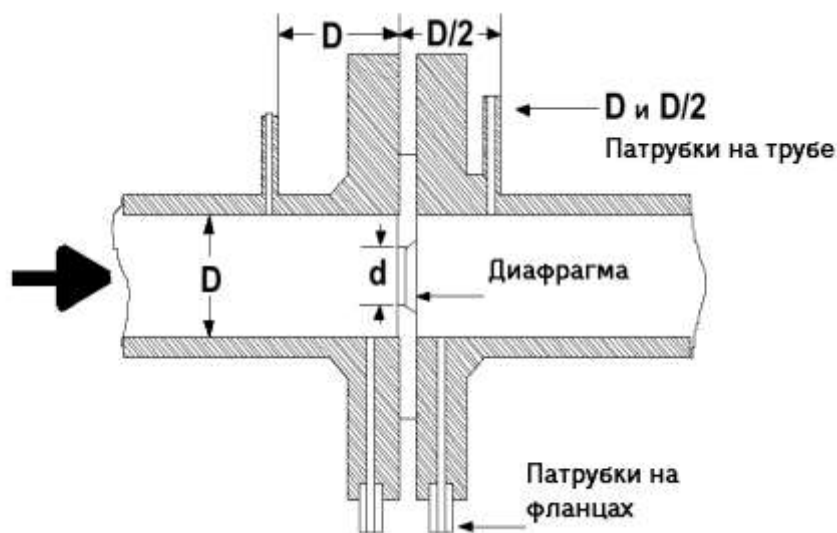


Рисунок 19 - Фланцевый и трехрадиусный способы отбора импульса давления на диафрагме

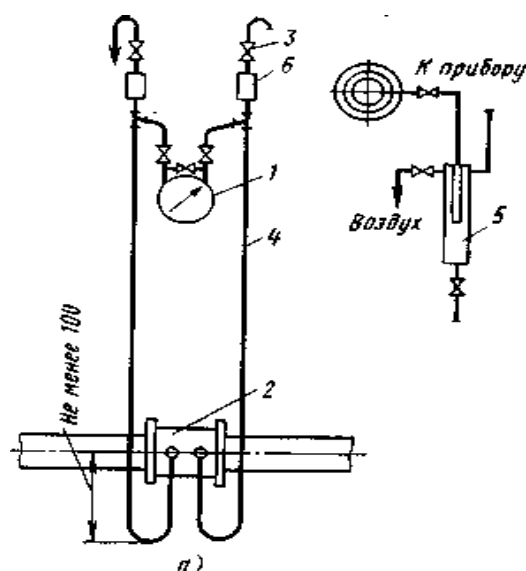


Рисунок 20 -Схемы соединения СУ с дифманометром при измерении расхода воды и неагрессивных жидкостей:

а – для чистой жидкости; б – для жидкости, содержащей взвешенные частицы; 1 – дифманометр; 2 –сужающее устройство; 3–запорные вентили; 4–соединительные трубки; 5 – отстойные сосуды; 6–газосборники

а)

б)

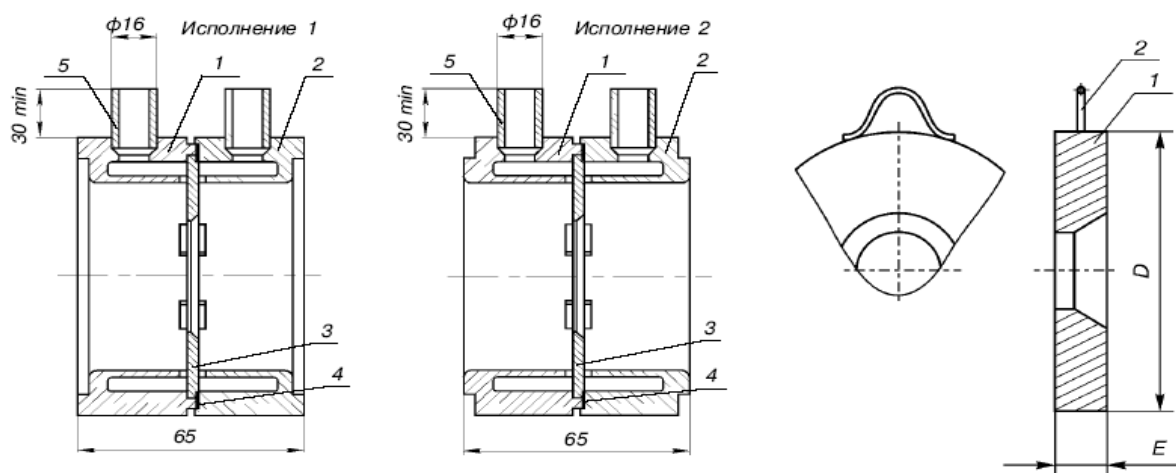


Рисунок 21 - Диафрагмы:

а – камерные: 1 – корпус плюсовой кольцевой камеры; 2 – корпус минусовой кольцевой камеры; 3 – диафрагма; 4 – уплотнительная прокладка; 5 – патрубок;
б – бескамерные: 1 – диафрагма; 2 – ушко

Расходомеры на базе осредняющей напорной трубки Annubar предназначены для измерения расхода жидкости, газа, пара в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности, а также в системах технологического и коммерческого учета. Их основные достоинства:

- многопараметрические измерения и вычисление расхода;
- установка в трубопровод через одно отверстие;

- возможность установки в трубопровод без сброса давления (конструкция Flo-Tap);
- минимальная вероятность утечек измеряемой среды благодаря интегральной конструкции;
- низкие потери давления по сравнению с большинством других расходомеров;
- существенное снижение стоимости монтажа и обслуживания благодаря особенностям конструкции Annubar
- легкость взаимодействия с существующими АСУТП или вычислителями расхода посредством интеллектуального протокола коммуникаций HART;
- простота перенастройки динамического диапазона;
- высокая надежность, отсутствие движущихся частей.

Принцип действия расходомеров основан на измерении расхода среды (жидкости, газа, пара) методом переменного перепада давления с использованием осредняющей напорной трубки (ОНТ, сенсор) Annubar.

Осредняющая напорная трубка Annubar представляет собой трубку ромбовидной (Diamond) или Т-образной формы, с отверстиями на передней и задней гранях, разделённую перегородкой на две камеры, в которых возникает разность давлений P_1 - P_2 , пропорциональная объёмному расходу (рисунок 22, а, б). Передняя грань находится в зоне динамического напора P_1 , а отверстия на противоположной грани и камеры P_2 сообщаются с зоной разрежения. Сенсор устанавливается перпендикулярно направлению потока, пересекая его по всему сечению. Такая конструкция применяется для измерения расхода в трубах с Ду от 50 до 1800 мм.

Annubar 485 (Т-образная форма) устанавливается фронтальной частью навстречу потоку, пересекая его по всему сечению. В центр фронтальной поверхности профиля, по всей его длине симметрично относительно центра оси трубопровода располагаются щелевидные пазы, осредняющие скорость потока измеряемой среды и воспринимающие давление торможения, которое передается в «плюсовую» камеру P_1 .

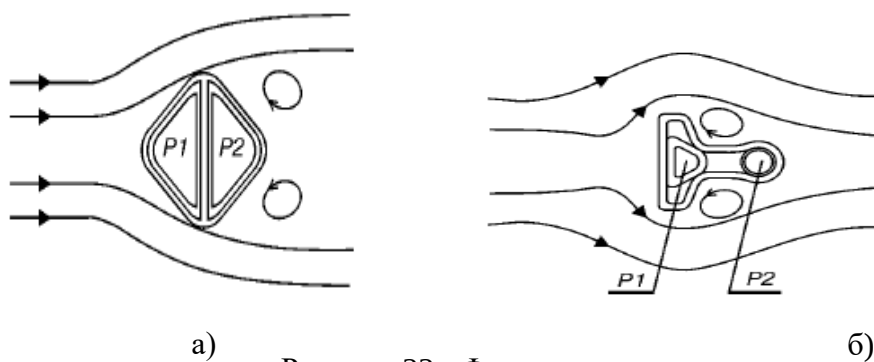


Рисунок 22 - Форма сенсора расходомера
а – ромбовидная, б – Т-образная

Важно то, что благодаря замене точечных отверстий щелевидными пазами, осреднение скорости стало более полным и точным, а сама ОНТ меньше засоряется. Фронтальная часть профиля Т-образной формы широкая и плоская, поэтому точка отрыва потока более стабильна (значит, стабильнее сигнал перепада давления), а зона повышенного давления перед профилем более обширна. В результате сигнал давления, передаваемый камерой *P1* на измерительную мембрану датчика, на Т-образном профиле выше, чем на других формах профилей при том же расходе. По всей длине Anpubar 485 с тыльной стороны профиля расположены отверстия, воспринимающие давление разрежения, которое передается в «минусовую» камеру *P2*. Благодаря вогнутости тыльной стороны Т-образного профиля, мертвые зоны за ним также больше, чем на других профилях ОНТ. Следовательно, сигнал давления, передаваемый камерой *P2*, ниже при том же расходе.

В итоге, сигнал перепада давления $\Delta p = p_1 - p_2$ на ОНТ Anpubar 485 выше и стабильнее при том же значении расхода, то есть чувствительность выше. В конструкции Anpubar 485 предусмотрена гильза для установки термопреобразователя ТСП Pt 100, что обеспечивает также измерение температуры продукта без дополнительной врезки в трубопровод.

На рисунке 23 показан внешний вид расходомеров Метран 350, а на рисунке 24 приведены отклонения, допускаемые при монтаже.



Рисунок 23 -
Расходомеры
Метран– 350

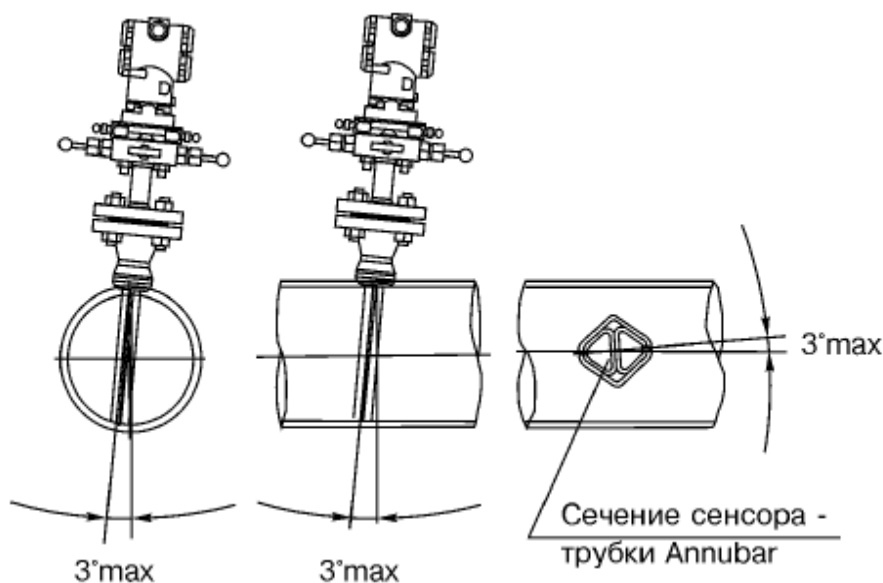


Рисунок 24 - Допускаемые отклонения при монтаже расходомера

Задание 1

Рассчитать диаметр отверстия диафрагмы d_{20} расходомера с сужающим устройством и выполнить эскиз СУ, если известны основные параметры и материал трубопровода. Номер является вариантом задания (таблица 11).

Задание 2

Используя исходные данные ГОСТ 8.568-2005, рассчитать с помощью Программного комплекса «Расходомер СТ» диаметр отверстия СУ и относительную погрешность, неопределенность результата измерения.

Таблица 11

Варианты заданий для расчета диафрагмы расходомера

№	Максимальный расход, м ³ /ч	Условный проход Ду, мм	Рабочий диапазон дифманометра, кПа	Материал трубопровода
1	6	50	1000	Ст 20
2	7	80	1200	Ст3
3	3	25	500	Ст 20
4	4	30	400	Ст X18H9T
5	5	40	450	Ст 20
6	9	100	1500	Ст3
7	7	80	1200	Ст 20
8	6	50	1000	Ст X18H9T
9	3	25	500	Ст 20
10	9	100	1500	Ст3
11	7	80	1200	Ст 20
12	6	50	1000	Ст X18H9T

13	6	50	1000	Ст 20
14	6	50	1000	Ст3
15	6	50	1000	Ст 20

Контрольные вопросы

1. Чему равен объемный расход?
2. Какие переменные и константы входят в уравнение расходомера с СУ?
3. Какие преимущества имеет расходомер с ОНТ?

Литература

1. [4].
2. [7].
3. [9].
4. [17].

2.7. Практическое занятие 8. Расходомеры вихреакустические

Содержание занятия: определения, уравнение измерения, приборы и устройства вихревые и вихреакустические.

Основной материал:

Метран-300ПР - это вихреакустический преобразователь объемного расхода с ультразвуковым детектированием вихрей.

Принцип действия преобразователя расхода основан на зависимости частоты образования вихрей за телом обтекания, установленным в проточной части преобразователя расхода от объемного расхода потока (рисунок 25). По форме тело обтекания может быть круглое, квадратное, треугольное, трапецевидное или сложной формы. Из-за разности давлений на передней и задней сторонах тела обтекания образуется вихревой поток.

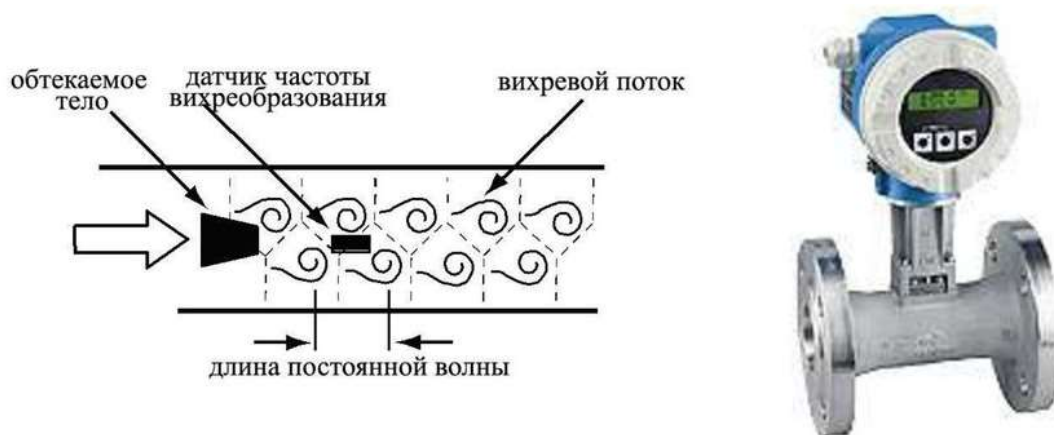


Рисунок 25 – Принцип действия и внешний вид вихревого расходомера

При этом завихрения начинают образовываться не одновременно, а поочередно с одной и с другой стороны. Данный эффект носит имя Теодора фон Кармана и называется «вихревой дорожкой Кармана». От формы тела обтекания зависят метрологические характеристики вихревого расходомера, стабильность и динамический диапазон измерений, возникающей при движении рабочей среды, на боковых поверхностях тела обтекания образуются завихрения. Частота вихреобразования («дорожки Кармана») определяется при помощи ультразвукового луча, имеющего частоту 1МГц (ультразвуковое детектирование вихрей). Суть эффекта заключается в том, что образование вихрей происходит поочередно на противоположных ребрах тела обтекания. При этом частота образования вихрей прямо пропорциональна скорости потока:

$$f = Sh (v/d), \quad (27)$$

где f - частота образования вихрей Кармана, Sh - число Струхалья, v - скорость потока среды, d - ширина тела обтекания.

Число Струхалья - эмпирическая величина, определенная геометрией расходомера и свойствами среды.

Однако данный эффект имеет естественные ограничения. При малых скоростях поток ламинарно огибает препятствие без образования вихрей. Упорядоченное образование вихрей начинается только с определенного порога (рисунок 26).

Ламинарный поток

Переходной поток

Турбулентный поток

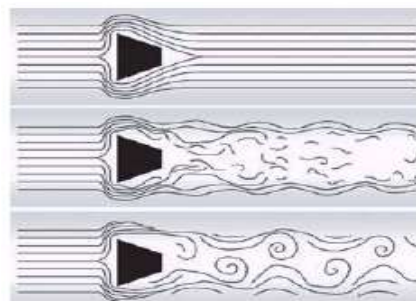


Рисунок 26 - Режимы течения потока

Известная величина в гидродинамике – число Рейнольдса – позволяет привести все среды к одному безразмерному параметру, который характеризует турбулентность течения потока:

$$Re = \rho v d / \mu, \quad (28)$$

где v – скорость среды; μ – ее вязкость; ρ – плотность среды; d – диаметр трубопровода.

При малом Re , порядка нескольких десятков, течение ламинарно, при Re больше нескольких тысяч устанавливается развитый турбулентный режим. В вихревых расходомерах используется тот эффект, что в определенном диапазоне чисел Рейнольдса число Струхалья Sh практически постоянно (рисунок 27), благодаря чему получается, что коэффициент преобразования

скорости потока в частоту вихрей становится не зависящим ни от плотности, ни от вязкости измеряемой среды и одинаков для всех типов сред.

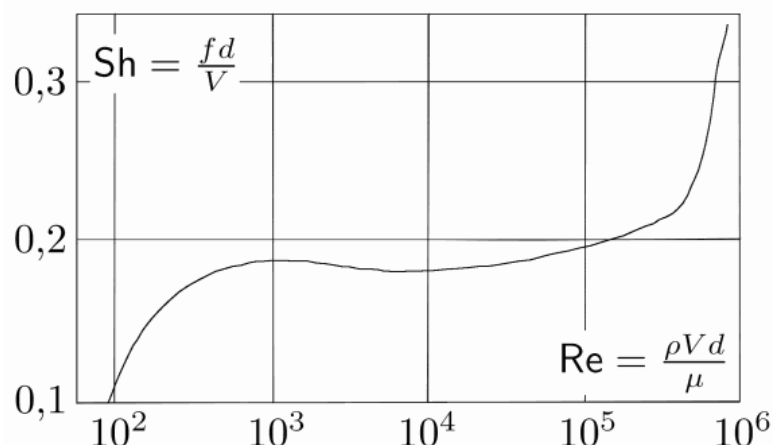


Рисунок 27 – Зависимость числа Струхала от чисел Рейнольдса

Задание 1

Рассчитать, используя уравнение (27), частоту образующихся вихрей при известных параметрах ОНТ, диаметре проточной части, гидродинамическом режиме потока, диапазоне измерения и выполнить эскиз тела обтекания.

Варианты заданий представлены в таблице 12.

Таблица 12

Варианты задания для расчета параметров вихревого расходомера

№	Максимальный расход, м ³ /ч	Условный проход Ду, мм	Число Рейнольдса x 10 ³	Параметр (d) и тип ОНТ
1	6	50	100	Призма, 15 мм
2	7	80	120	Призма, 20 мм
3	3	25	5	Призма, 5
4	4	30	250	Призма, 10
5	5	40	100	Призма, 15 мм
6	9	100	150	Т-образ., 25 мм
7	7	80	120	Призма, 5
8	6	50	100	Призма, 10
9	3	25	5	Призма, 10
10	9	100	1500	Т-образ., 25 мм
11	7	80	120	Призма, 20 мм
12	6	50	10	Призма, 5
13	6	50	10	Призма, 10

14	6	50	10	Призма, 15 мм
15	6	50	10	Призма, 20 мм

Контрольные вопросы

1. Чему равен объемный расход из уравнения 19?
2. Какие переменные и константы входят в уравнение вихревого расходомера?
3. Какие преимущества и ограничения имеет МЕТРАН 300 ПР по сравнению с электромагнитными расходомерами?

Литература

1. [9].
2. [10].
3. [17].

2.8. Практическое занятие 9. Расходомеры электромагнитные

Содержание занятия: определения, уравнение НСХ, устройство, дополнительная погрешность.

Основной материал:

Принцип действия электромагнитного расходомера основан на зависимости ЭДС индукции, возникающей в потоке электропроводной жидкости, протекающей в магнитном поле, от скорости потока, а значит, и от объемного расхода (рисунок 28).

Уравнение НСХ расходомера:

$$E_u = \frac{4B_{\max} \sin \omega t}{\pi D} G_o, \quad (29)$$

где E_u – ЭДС индукции; B – магнитная индукция; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; D – расстояние между электродами; G_o – объёмный расход жидкости.

Как следствие из уравнения НСХ, если расстояние между электродами не постоянно, то появляется дополнительная погрешность. В связи с этим отложение оксидов железа и заиливание электродов, внутренней поверхности фторопластового покрытия вызывает изменение межэлектродного расстояния ($D \neq const$) и возникновение дополнительной погрешности.

Область применения электромагнитных расходомеров – это производство кислот, щелочей, очистка промстоков, в тех случаях, когда измеряемая среда электропроводна. При эксплуатации в системе ЖКХ, в которой теплофикационная вода содержит много железа (ржавчина стальных трубопроводов), проточную часть электромагнитных трубопроводов необходимо периодически очищать, что является техническим недостатком данных расходомеров.

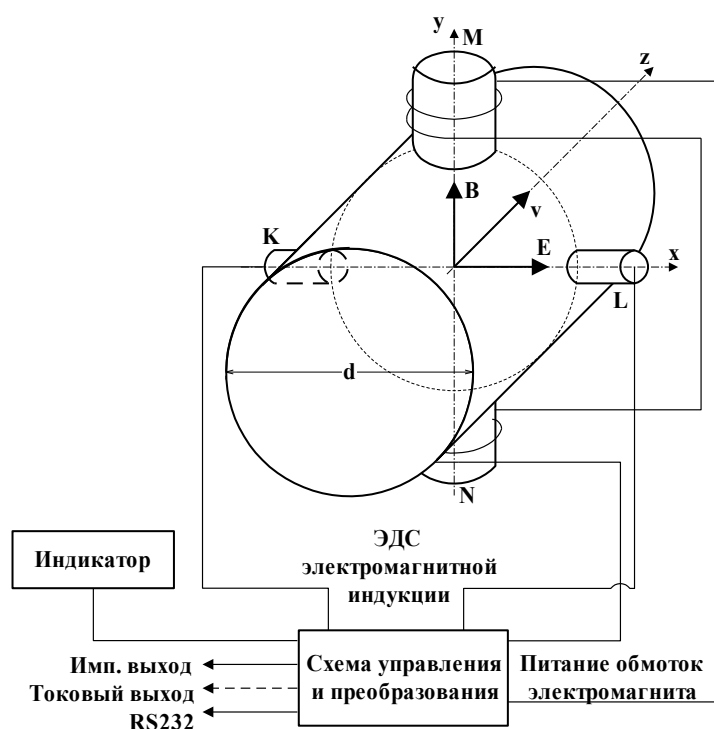


Рисунок 28 - Принципиальная схема ЭМР с переменным магнитным полем

Задание 1.

Применив формулу (29), рассчитать значение ЭДС индукции при известных параметрах проточной части (D_y), диапазоне измерения и выполнить эскиз расходомера.

Варианты индивидуальных заданий представлены в таблице 13.

Таблица 13

Варианты задания для расчета параметров электромагнитного расходомера

№	Максимальный расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	Условный проход D_y , мм	Магнитная индукция, Гн	Материал немагнитного покрытия
1	6	50	100	фторопласт
2	7	80		
3	3	25		
4	4	30		
5	5	40		
6	9	100		
7	7	80		
8	6	50		
9	3	25	200	кремний
10	9	100		
11	7	80		
12	6	50		

13	6	50		
14	6	50		
15	6	50		

Контрольные вопросы

1. Чему равна угловая частота?
2. Какие ограничения на применение электромагнитных расходомеров имеются?
3. Можно ли применять электромагнитный расходомер на измерение пара?
4. Что произойдет, если в воде будет присутствовать железо?

Литература

1. [9].
2. [17].

2.9. Практическое занятие 10. Анализаторы pH растворов

Содержание занятия: изучить принцип потенциометрического метода анализа pH, состав электродной ячейки, методику измерения.

Основной материал:

Принцип действия основан на зависимости потенциала измерительного электрода от концентрации потенциалопределяющих ионов в растворе. Эта зависимость описывается уравнением Нернста

Понятие pH введено для линеаризации уравнения Нернста: pH (p – potencio, степень; H – символ водорода) – равен отрицательному десятичному логарифму концентрации H-ионов в растворе. Введя такую подстановку, можно от логарифмического уравнения перейти к линейному, алгебраическому.

Измерительный электрод (ИЭ) – это стеклянный или водородный электрод, потенциал которого зависит от концентрации H – ионов в растворе. Электрод сравнения (ЭС) служит для контакта и замыкания цепи через исследуемый раствор (рисунок 29). Потенциал ЭС не изменяется и не зависит от концентрации H- ионов.

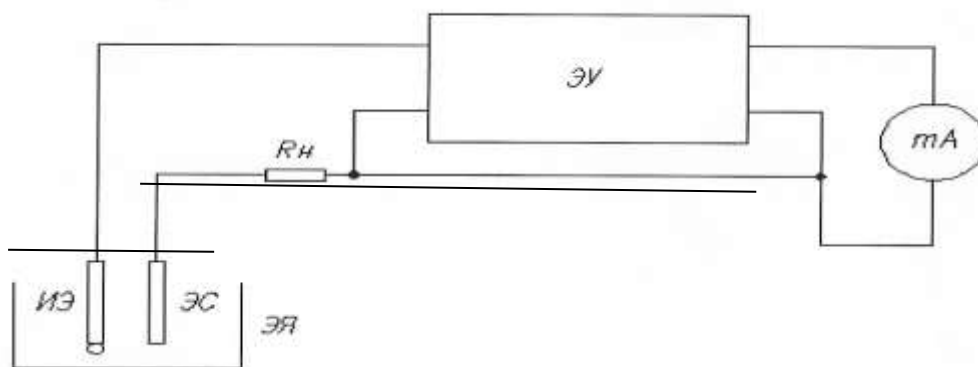


Рисунок 29 - Принципиальная схема pH-метра

Зависимость потенциала измерительного электрода от концентрации потенциалопределяющих ионов математически описывается уравнением Вальтера Нернста:

$$E_x = E_0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln C_{M+}, \quad (30)$$

где E_x – поверхностный равновесный потенциал измерительного электрода; E_0 – стандартный (нормальный) окислительно-восстановительный потенциал данного металла в растворе, активность которого равна единице; $R = 8,31$ – универсальная газовая постоянная; T – температура раствора, К; n – валентность металла; F – число Фарадея; C_{M+} – активная концентрация ионов металла в растворе, моль/дм³.

Для электродной ячейки и любой температуры раствора в диапазоне от 25 до 100 °С эта зависимость, называемая уравнением водородной функции, имеет вид:

$$E_y = -E_u - (S_y + at) \cdot (pH - pH_u), мВ \quad (31)$$

$$E_y = -E_u - (54,197 + 0,1984 t) \cdot (pH - pH_u), мВ$$

где t – температура раствора, °С; pH_u , E_u – номинальные значения координаты изопотенциальной точки электродной системы, состоящей из измерительного и вспомогательного электродов, соответственно pH , $мВ$, a – температурный коэффициент раствора, S_y – крутизна водородной характеристики ($S_y = \Delta E / \Delta pH$ $мВ/pH$).

Устройство pH-метра: в состав анализатора входит электродная ячейка и высокоомный измеритель напряжения (потенциометр или цифровой вольтметр), имеющий токовый выход (рисунок 30).

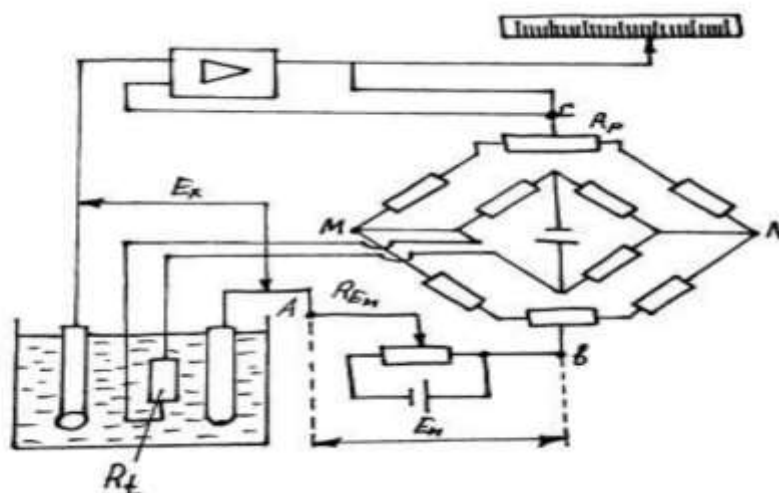


Рисунок 30 - Принципиальная схема рН-метра с автоматической компенсацией температурной погрешности и аналоговым выходным сигналом
ИЭ- измерительный стеклянный электрод; ЭС – хлорсеребряный электрод сравнения; ЭЯ – электродная ячейка с анализируемым раствором; ЭУ – усилитель с высоким входным сопротивлением (высокоомный); МА – токовый индикатор.

Задание 1.

С помощью ПК рассчитать и построить график водородной функции в диапазоне рН от 0 до 12 единиц для указанных условий измерения (таблица 14). Номер является вариантом задания.

Таблица 14

Варианты задания для расчета параметров рН-метра

№	Температура, °C	рН _и , мВ	№	Температура, °C	рН _и , мВ
1	20	-2	4	10	-2
1	40	-2,1	5	15	-2,1
2	50	-2,14	6	25	-2,14
3	60	-2,04	7	30	-2,04
9	25	-2,3	10	35	-2,3

Задание 2.

Дать определение рН, получить из уравнения В. Нернста уравнение водородной функции для нормальных условий, доказать математически, почему рН нейтральной среды равно 7.

Контрольные вопросы

1. рН – метры – это анализаторы качественного или количественного анализа?
2. Дать определение численного значения рН.
3. Кто автор такого определения?
4. Показания анализатора рН зависят от температуры?

Литература

1. [13].
2. [16].
3. [22].

2.10. Практическое занятие 11. Хроматографы - анализаторы многокомпонентных смесей

Содержание занятия: изучить принцип метода хроматографического анализа, алгоритмы обработки результатов измерений хроматографа.

Основной материал:

Принцип действия газового хроматографа основан на различной сорбируемости компонентов смесей газов или жидкостей на твердой поверхности. Такой процесс называется *адсорбцией*. Открытие хроматографического метода как метода разделения качественного и количественного анализа многокомпонентных смесей принадлежит русскому учёному М. С. Цвету (1903).

Адсорбция – процесс поглощения газов или паров из газовых, парогазовых или жидких смесей твердыми поглотителями – адсорбентами. Адсорбция применяется, главным образом, при небольших концентрациях поглощаемых веществ в исходных смесях, когда требуется достичь практически полного извлечения одного из веществ. Зависимость между величиной адсорбции и концентрацией вещества при постоянной температуре описывается *уравнением Ленгмюра*. В соответствии с теорией Ленгмюра количество a вещества, поглощаемого единицей массы адсорбента в равновесном состоянии, равно:

$$a = mbC/(1+bC), \quad (32)$$

где m и b – постоянные, зависящие от свойств адсорбента и адсорбируемого вещества (сорбата); C – концентрация раствора.

Если $C \ll 1$, то $a = mbC$

Данная зависимость является линейной. Этот случай соответствует *уравнению Генри*: $a = GC$, где G – коэффициент Генри.

График зависимости $a = f(C)$ при постоянной температуре, называемой *изотермой адсорбции*, является основной характеристикой адсорбционной способности сорбента (рисунок 31).

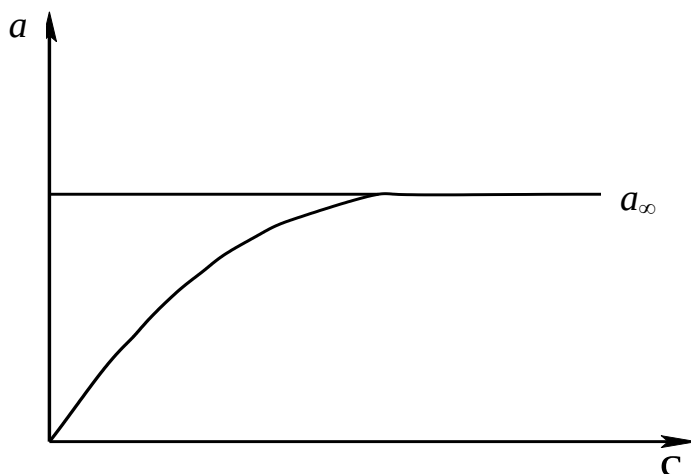


Рисунок 31 - Изотерма процесса адсорбции

a – величина адсорбции; C – концентрация анализируемого вещества; a_{∞} – емкость монослоя.

Газовый аналитический хроматограф представляет собой совокупность взаимодействующих систем, предназначенных для проведения анализа в оптимальном режиме: он состоит из источника газа-носителя, системы очистки и осушки газа, детектора по теплопроводности, хроматографической колонки и системы автоматического регулирования (САР) температуры в термостате колонки. После хроматографического разделения исследуемой смеси в хроматографической колонке с целью определения ее состава, детектор путем преобразования изменения физических и физико-химических свойств смеси вырабатывает электрический сигнал при изменении теплопроводности проходящей паро-газовой смеси.

Полученный результат измерения хроматографом называется хроматограммой (рисунок 32).

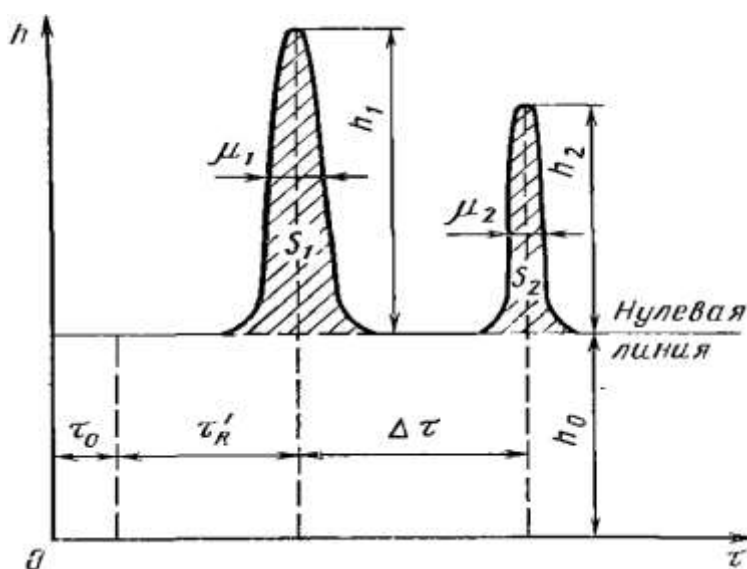


Рисунок 32 - Хроматограмма двухкомпонентной смеси

В таблице 15 приведены относительные теплопроводности различных газов и паров.

Таблица 15

Относительная теплопроводность для газов и паров

Газ	λ_{Γ} , кВт/(м · °С)	$\lambda_{\Gamma}/\lambda_{\text{В}}$	Газ	λ_{Γ} , кВт/(м · °С)	$\lambda_{\Gamma}/\lambda_{\text{П}}$
Азот	23,72	0,996	Оксид	22,94	0,965
Аммиак	21,33	0,879	углерода		
Водород	169,60	7,130	Сернистый	8,17	0,344
Воздух	23,78	1,000	ангидрид	12,79	0,538
Двуокись	42,71	1,796	Сероводород	14,59	0,614
азота	24,16	1,016	Углекислый	7,65	0,322
Кислород	31,38	1,320	газ	23,15	0,973
Метан			Хлор		
			Водяной пар		
			(при 100 °С)		
Примечание λ_{Γ} и $\lambda_{\text{В}}$ - коэффициент теплопроводности, соответственно, газа и воздуха					

Задание 1.

Подобрать оптимальное сочетание газа-носителя и газа адсорбата и рассчитать суммарную концентрацию и теплопроводность смеси в соответствии с вариантом (таблица 16).

Задание 2.

Привести принципиальную газовую схему хроматографа и измерительную схему детектора по теплопроводности.

Таблица 16

Варианты задания для расчета параметров хроматографа

№	Газ-носитель	проба	№	Газ-носитель	проба
1	Водород	метан	8	Водород	
1	Воздух	этан	9	Гелий	
2	Двуокись азота	пропан	10	Азот	
3	Азот	бутан	11	Водород	
4	Оксид углерода	Этиловый спирт	12	Воздух	
5	Водород	сахароза	13	Двуокись азота	
6	Гелий	фруктоза	14	Воздух	
7	Азот		15	Азот	

Контрольные вопросы

- 1) Кто автор метода разделения и анализа многокомпонентных газовых смесей?

- 2) Что такое сорбция, адсорбция, абсорбция, десорбция?
- 3) В чем назначение детектора хроматографа?
- 4) Как по хроматограмме определить состав смеси?

Литература

1. [13].
2. [22].
3. [23].

2.11. Практическое занятие 12. Кондуктометрические концентратомеры

Содержание занятия: изучение принципа действия, устройства и номенклатуры приборов контроля концентрации и электропроводности растворов

Основной материал:

Принцип действия кондуктометрических анализаторов основан на зависимости удельной электропроводности растворов от концентрации анионов и катионов (рисунок 33). Удельная электропроводность некоторых растворов приведена на рисунке 34.

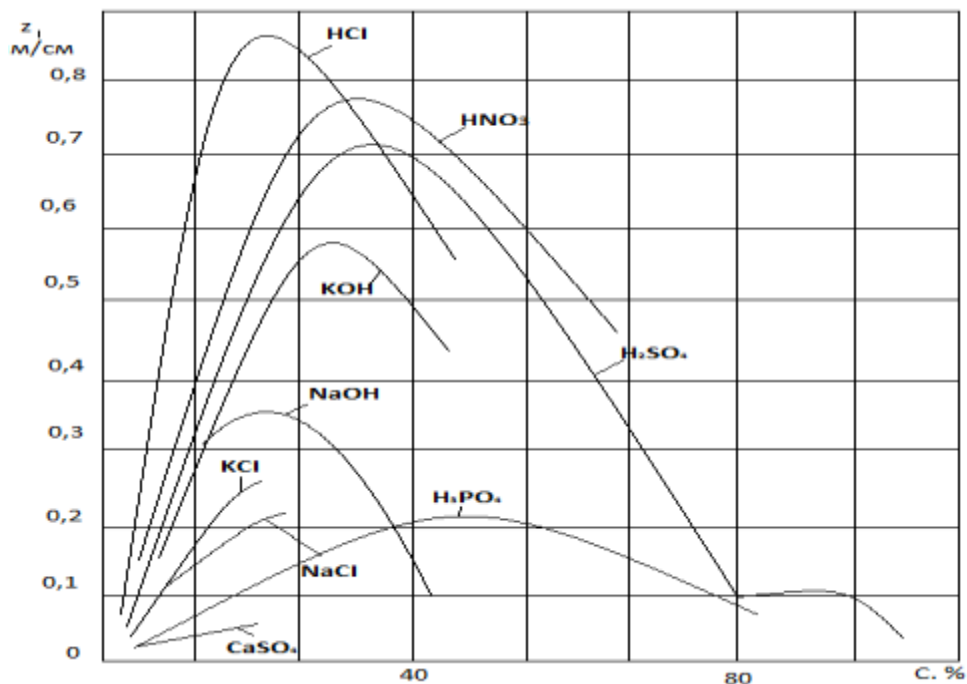


Рисунок 33 - Зависимость удельной электропроводности от концентрации

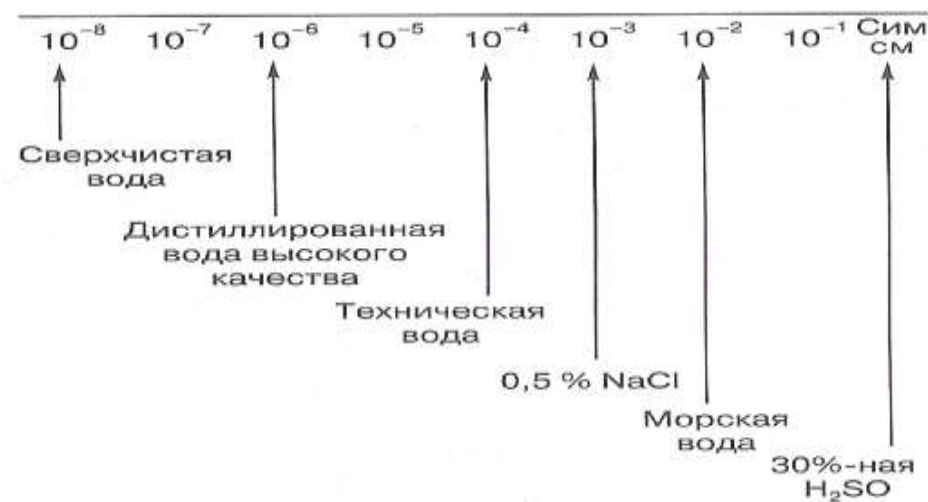


Рисунок 34 - Удельная электропроводность некоторых растворов

Математическая модель измерения:

$$K = \alpha \cdot n \cdot (U^+ + U^-) \cdot C, \quad (33)$$

где α - степень диссоциации электролита, величина постоянная; n - валентность; U^+ , U^- подвижность (скорость перемещения, зависит от температуры раствора) ионов; C - концентрация.

Удельная электропроводность - величина, обратная значению удельного сопротивления:

$$k = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{R \cdot S} \text{ (См/см)} \quad (34)$$

где $\rho = \frac{R \cdot S}{l}$ - удельное сопротивление (сопротивление слоя раствора длиной $l = 1$ см, заключенного между электродами площадью $S = 1 \text{ см}^2$);

Отношение расстояния между электродами к площади поверхности электрода называется постоянной ячейки: $K_{\text{я}} = l/S$.

С учетом этого удельная электропроводность равна:

$$k = \frac{K_{\text{я}}}{R} \quad (35)$$

Исходя из уравнения (35) измерительной схемой кондуктометра может быть мост сопротивлений, так как $K_{\text{я}} = \text{Const}$.

Устройство кондуктометрического анализатора:

Анализатор состоит из электродной ячейки (рисунок 35) погружного или проточного типа и измерительно-преобразующего блока с дисплейным модулем. Электроды в ячейке - это металлические пластины круглой или прямоугольной формы, расположенные на строго определенном расстоянии друг от друга.

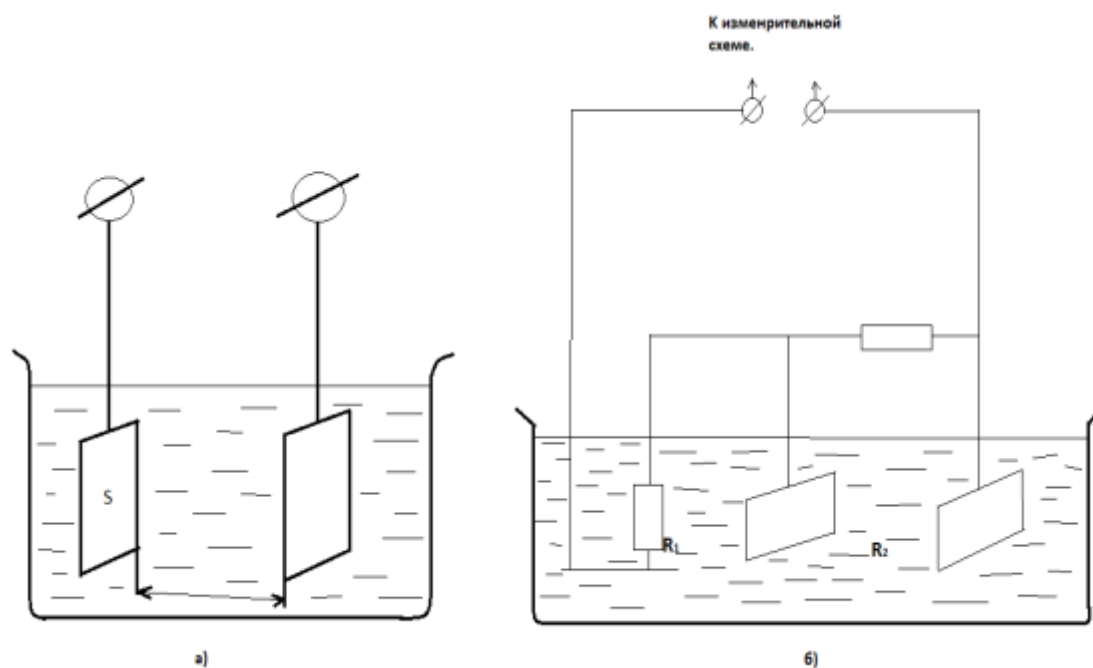


Рисунок 35 - Принципиальная схема двухэлектродной ячейки контактного кондуктометра:
а) пластинчатые электроды; б) электродная ячейка с термокомпенсатором (термометром сопротивления).

Уравнение Кольрауша позволяет определить удельную электропроводность растворов при любой температуре, если она известна при температуре $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$K_t = K_{20}[1 + \alpha(t - t_0)] \quad (36)$$

где K_{20} – удельная электропроводность раствора при нормальной температуре ($+20\text{ }^{\circ}\text{C}$); α – температурный коэффициент электрической проводимости; t, t_0 – рабочая и нормальная температура раствора.

Как видно из уравнения, электропроводность жидкости возрастает с увеличением температуры.

Двухэлектродные кондуктометры просты по устройству, но имеют низкую точность из-за поляризации электродов. Более точными являются четырехэлектродные контактные или бесконтактные кондуктометры (рисунок 36).

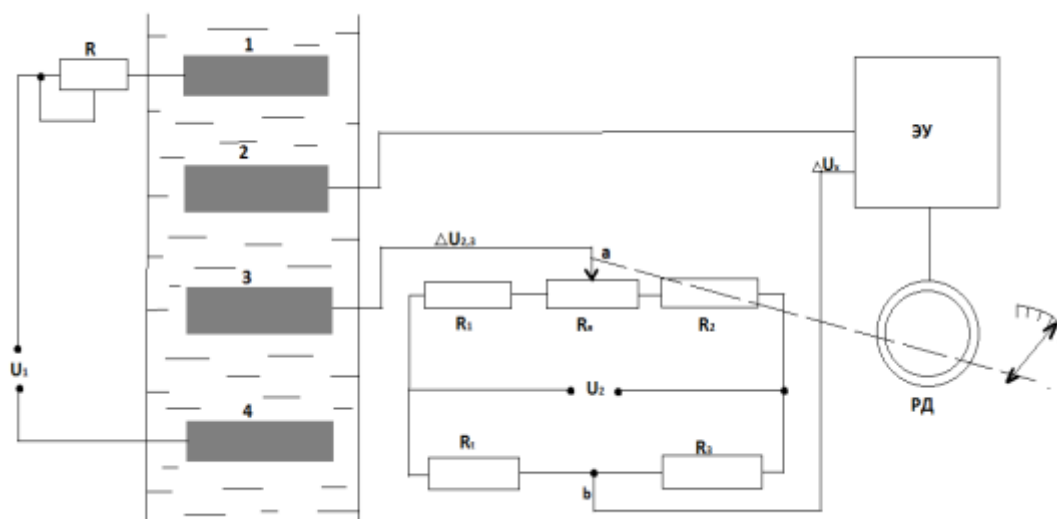


Рисунок 36 - Контактный кондуктометр с четырехэлектродной ячейкой: 1,4 – токовые электроды питания; 2,3 – измерительные потенциометрические электроды (металлические пластинки); R_t – термометр сопротивления; R_1, R_2, R_3, R_4 – схема уравновешенного моста, предназначенная для автоматической компенсации температурной погрешности; ЭУ – электронный усилитель; РД – реверсивный двигатель.

Задание 1.

Определить по графику (рисунок 33) концентрацию и рассчитать по формуле (36) удельную электропроводность растворов при нормальных условиях ($t = 20^\circ\text{C}$) по исходным данным варианта (таблица 17).

Задание 2.

Рассчитать удельные электропроводности этих же растворов для данной температуры раствора по уравнению Кольрауша по исходным данным варианта (таблица 17).

Таблица 17

Варианты задания для расчета электропроводности растворов

№	Соединение	Температура, $^\circ\text{C}$	№	Соединение	Температура, $^\circ\text{C}$
1	Азотная кислота	20	6	Хлористый натрий	30
2	Уксусная кислота	25	7	KCl	30
3	Соляная кислота	16	8	Кальций сернокислый	40
4	Серная кислота	20	9	NaOH	26
5	Фосфорная кислота	25	10	KOH	30

Контрольные вопросы

1. Принцип действия, уравнение НСХ кондуктометра.

2. Причина температурной погрешности кондуктометров.
3. Что позволяет определить уравнение Кольрауша?

Литература

1. [13].
2. [19].
3. [22].

2.12. Практическое занятие 13. Плотномеры

Содержание занятия: изучение принципа действия, устройства и номенклатуры приборов контроля плотности.

Основной материал:

Плотность - это физическая величина, определяемая как масса единицы объема V вещества, обозначается ρ или D и измеряется в кг/м³:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (37)$$

Плотномер - это прибор для непрерывного (или периодического) измерения плотности веществ в процессе их производства или переработки. Они устанавливаются непосредственно в технологических линиях или в заводских лабораториях. По принципу действия плотномеры делятся на следующие основные группы:

- поплавковые,
- весовые,
- гидростатические,
- радиоизотопные,
- вибрационные,
- ультразвуковые.

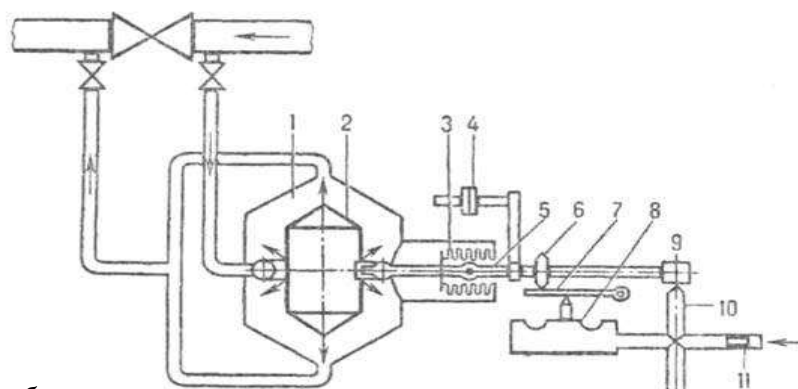
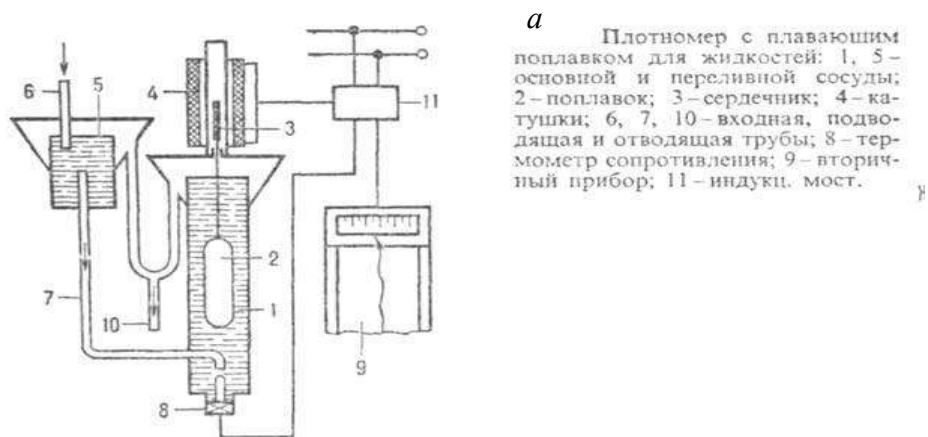
Действие поплавковых или ареометрических плотномеров основано на законе Архимеда: на тело, погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу вытесненной жидкости (сила Архимеда):

$$F_a = \rho g V, \quad (38)$$

где ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; V – вытесненный объём.

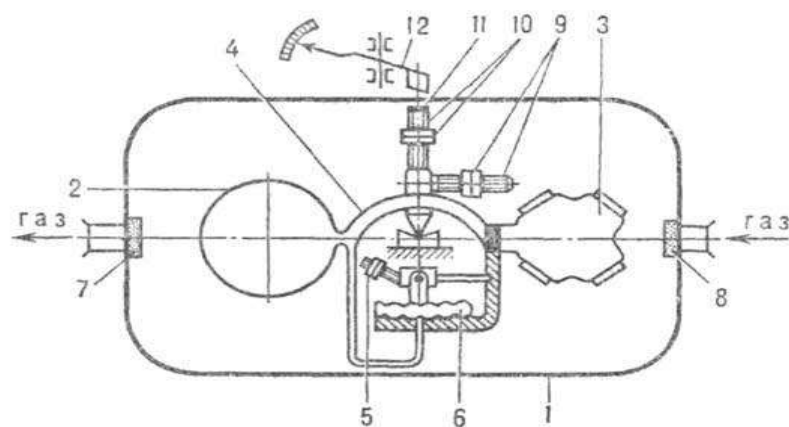
При постоянных и известных значениях g и V выталкивающая сила будет зависеть только от плотности.

Конструктивно поплавковые плотномеры делятся на ареометры постоянного веса - денсиметры (рисунок 37 а) и ареометры постоянного объема (рисунок 37 б, в).



б

Плотномер с погруженным поплавком для жидкостей: 1 – камера; 2 – поплавок; 3 – уплотнит. сильфон; 4 – противовес; 5 – коромысло; 6 – ролик; 7 – рычаг; 8 – мембранная коробка; 9 – заслонка; 10 – сопло; 11 – дроссель питающего воздуха; 12 – вторичный прибор.



в

Поплавковый плотномер для газов: 1 – камера; 2, 3 – герметичный и открытый шары; 4, 9, 10 – коромысло и устройства соотв. для его балансировки и регулировки чувствительности; 5 – груз; 6 – мембранная коробка; 7, 8 – фильтры; 11 – постоянный магнит; 12 – стрелка прибора.

Рисунок 37 - Поплавковые плотномеры

Допускаемая погрешность приборов этой группы равна $\pm 0,2-2\%$ от ВПИ.

Принцип действия *гидростатических плотномеров* (рисунок 38) основан на зависимости гидростатического давления или перепаде давлений столба жидкости при непрерывном продувании через неё инертного газа или воздуха (*пьезометрический плотномер*, рисунок 39).

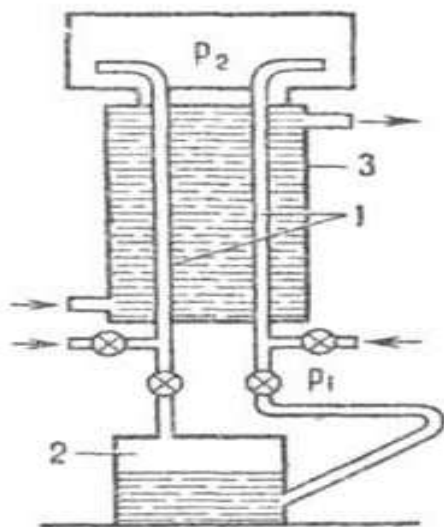


Рисунок 38 - Гидростатический плотномер для газов
1- трубка; 2 – дифманометр; 3 - термостат

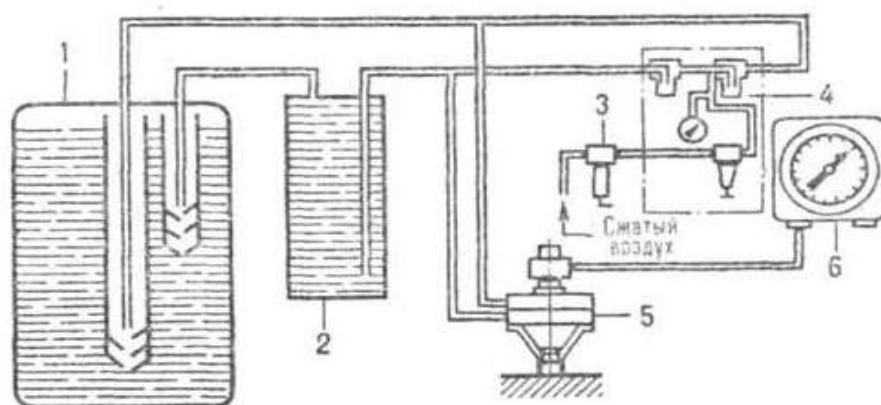
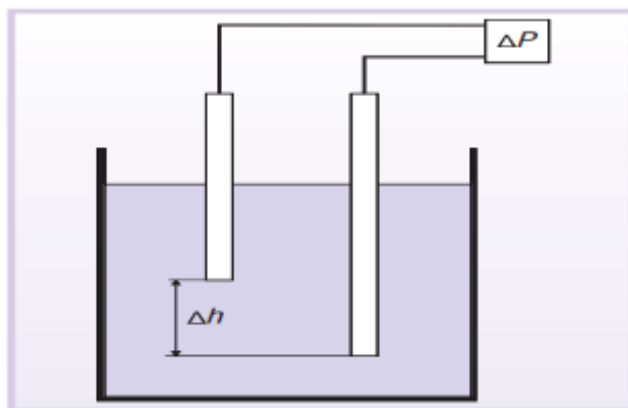


Рисунок 39 – Пьезометрический плотномер
1, 2 – сосуды, соответственно, с контрольной и сравнительной жидкостями; 3 – фильтр; 4 – измерительный блок с манометром; 5 – дифманометр; 6 – вторичный прибор

Чтобы исключить влияние колебаний температуры и уровня жидкости, часто применяют дифференцированный метод: продувают воздух одновременно через испытуемую и сравнительную жидкости, имеющие одинаковую температуру (термостатированные), и измеряют возникшую при этом разность давлений дифманометром (рисунок 40).



Задание 1.

Выбрать оптимальный плотномер для жидких сред в соответствии с вариантом задания (таблица 18), дать описание принципа действия и устройства, метрологических характеристик (диапазон измерения и допускаемая погрешность).

Таблица 18

Варианты задания для выбора плотномера

№	Жидкость	№	Жидкость
1	Молоко	9	водка
2	Барда	10	кефир
3	вино	11	Уксусная кислота
4	Свекольный сок	12	фруктовый нектар
5	сыворотка	13	йогурт
6	вода	14	Фруктовый сок
7	закваска	15	пиво
8	Дрожжевая суспензия		

Контрольные вопросы

1. Единицы измерения плотности.
2. Как устраняется температурная погрешность в гидростатических плотномерах?
3. Что измеряет ареометр и денсиметр?

Литература

1. [13].
2. [22].

2.13. Практическое занятие 14. Приборы контроля влажности

Содержание занятия: изучение принципа действия, устройства и номенклатуры приборов контроля влажности воздуха помещения и влажности сырьевых материалов

Основной материал: в пищевой промышленности контроль влажности воздуха необходим при хранении сырья и продукции, а, также как стандартный показатель качества готовой продукции. По принципу действия влагомеры воздуха (гигрометры) делятся на:

— психрометрические;

- точки росы;
- гигроскопические;
- сорбционные;
- диэлькометрические (емкостные).

Влагомеры твердых сыпучих тел могут быть кондуктометрическими, нейтронными, СВЧ –влагомерами.

Для контроля влажности воздуха в помещениях наиболее применим психрометрический или емкостной влагомер.

Влажность газа – это показатель содержания в нем водяного пара. Для характеристики влажности газов используется *относительная влажность* j , равная отношению его действительной влажности к максимально возможной влажности этого газа при данной температуре. Выражается либо в относительных единицах или в процентах и определяется соответственно по формуле:

$$j = e/E \text{ или } j = (e/E) * 100\%, \quad (39)$$

где e – упругость водяного пара, фактически находящегося в воздухе, Па; E – упругость насыщенного водяного пара при данной температуре, Па.

Приборы для измерения влажности называются *гигрометрами*. В основе сорбционного метода измерения влажности лежит способность некоторых веществ, имеющих пористую структуру, адсорбировать влагу на своей поверхности. Эта влага находится в равновесном состоянии с влажностью измеряемой среды. Количество влаги, адсорбируемой на поверхности, увеличивается с повышением влажности газа. Наряду с этим изменяются механические, электрические и массовые свойства материала, из которого изготовлены чувствительные элементы. Сорбционные влагомеры применяются для измерения влажности в широком температурном диапазоне от -40°C до $+300^{\circ}\text{C}$.

Сорбционный метод основан на связи физических свойств гигроскопических веществ с количеством поглощенной ими влаги, зависящей от влажности анализируемого газа.

Сорбционные влагомеры. В сорбционных влагомерах чувствительный элемент должен находиться в гигрометрическом равновесии с измеряемым газом. В практике технических измерений получили распространение следующие разновидности сорбционных преобразователей: электролитические, кулонометрические, пьезосорбционные и деформационные.

В *электролитических гигрометрах* (рисунок 41) измерительный преобразователь включает влапочувствительный элемент, содержащий электролит. Изменение влажности газа вызывает изменение количества влаги, содержащейся во влапочувствительном элементе, что приводит к изменению концентрации электролита во влапочувствительном элементе и

соответствующему изменению его сопротивления или емкости. В качестве электролита чаще всего применяют хлористый литий.

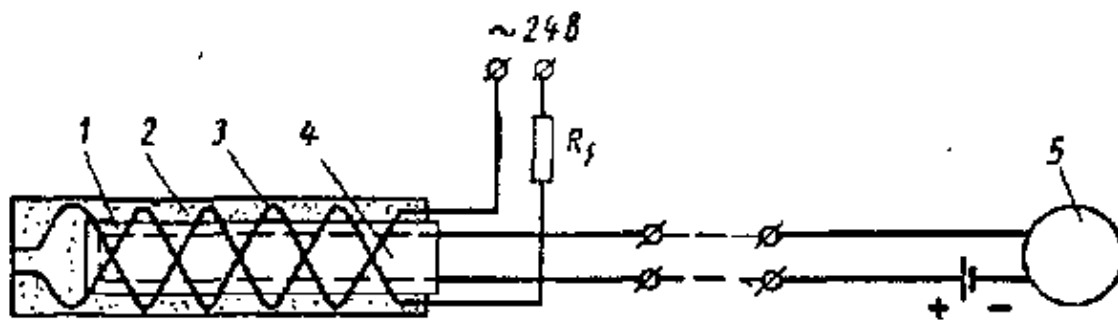


Рисунок 41 – Электролитический гигрометр с подогревным датчиком
1 – трубка; 2 – стеклянная вата; 3 – спирали; 4 – термометр сопротивления; 5 – измерительный прибор

Измерительные схемы электролитических гигрометров представляют собой различные варианты мостовых измерительных схем. К недостаткам электролитических гигрометров следует отнести нестабильность их градуировочных характеристик, а также влияние температуры и концентрации растворенного вещества на их показания.

Электролитические преобразователи с подогревом по своему устройству близки к электролитическим преобразователям. Однако их принцип действия отличается. Изменение электропроводности преобразователя вследствие изменения влажности газа вызывает изменение температуры преобразователя. Если влажность газа увеличивается, то электропроводность преобразователя увеличивается, что приводит к возрастанию тока, увеличению температуры преобразователя и испарению влаги из преобразователя. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению электропроводности, тока и температуры преобразователя.

Таким образом, автоматически поддерживается режим, соответствующий равновесному состоянию между парциальным давлением паров воды в анализируемом газе и парциальным давлением пара над насыщенным раствором электролита. Температура, соответствующая этому равновесию, измеряется каким-либо термопреобразователем. Электролитические гигрометры с подогревом относительно просты и надежны. Их характеристики практически не зависят от запыленности или загрязнения, скорости измеряемого газа, его давления и напряжения питания.

В *кулонометрических преобразователях* (рисунок 42) влажность газа определяют по количеству электричества, затраченного на электролиз влаги, которая поглощается частично гидратированным пентаоксидом фосфора. Измерительный преобразователь в этих приборах состоит из пластмассового корпуса, во внутреннем канале которого расположены два электрода в виде несоприкасающихся спиралей. Пространство между электродами заполнено частично гидратированным пентаоксидом фосфора, являющимся хорошим

осушителем. Влага газа, соединяясь с гигроскопическим веществом, образует раствор фосфорной кислоты с большой удельной проводимостью. Подключенное к электродам постоянное напряжение вызывает электролиз поглощенной влаги. Количество поглощенной и разложенной воды при постоянном расходе газа одинаково и определяется концентрацией влаги в анализируемом газе.

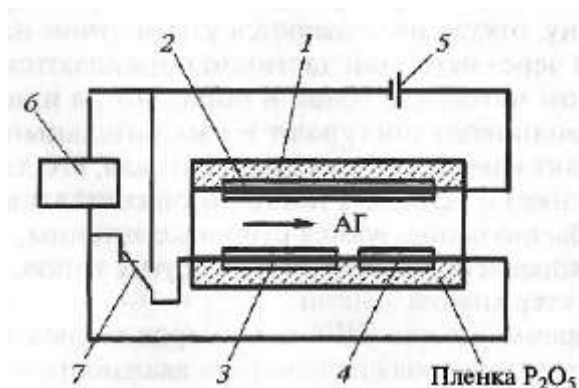


Рисунок 42 – Кулонометрический гигрометр

1- корпус; 2 – электрод родиевый общий; 3 – электрод родиевый рабочей части чувствительного элемента; 4 – электрод родиевый контрольной части чувствительного элемента; 5 – источник питания; 6 – отсчетное устройство; 7 - кнопка контроля чувствительного элемента

Преимуществом кулонометрических гигрометров является независимость их показаний от напряжения питания и состава газа. Загрязнения сорбента практически не влияют на показания прибора, метод не требует градуировки на эталонных смесях и может быть использован для измерения микроконцентраций влаги в газах.

К недостаткам метода относится необходимость исключения паров и газов, имеющих щелочную реакцию (аммиак, амины). Их присутствие выводит из строя чувствительный элемент. На показания существенно влияют пары спиртов, которые гидролизуются на пентаоксиде фосфора с образованием воды.

В *пьезосорбционных гигрометрах* используется зависимость частоты собственных колебаний кварцевого резонатора от массы влаги, поглощенной сорбентом, нанесенным на поверхность кварцевой пластины.

Метрологические характеристики пьезосорбционных гигрометров определяются материалом сорбента и технологией его нанесения на поверхность кварцевой пластины. Применение в качестве сорбентов силикагеля, цеолитов, сульфированного полистирола позволяет использовать пьезосорбционный метод для измерения микроконцентраций влаги в газах. Конструкция чувствительного элемента прибора достаточно проста.

Пьезосорбционные гигрометры требуют градуировки по газовым смесям с известной влажностью. Возможны дополнительные погрешности

за счет сорбированных помимо влаги других примесей анализируемого газа. Пьезосорбционные гигрометры применяются в химической промышленности и при испытаниях материалов и изделий в термобарокамерах.

Гигрометры для измерения влажности газов производятся отечественными фирмами: ИПТВ 056 (Элемер), зарубежными фирмами: мод. 340, серия 800 (Rosemount), мод. 4112 (Honeywell), Dewcel (Foxboro), мод. 70 (20—23, 31, 32, 51) (Jumo) и др.

Задание 1.

В соответствии с вариантом задания и условиями контроля (таблица 19) выбрать тип влагомера, дать характеристику его принципа действия и устройства. Номер является вариантом задания.

Таблица 19

Варианты задания для выбора влагомера

№	Контролируемая среда или продукт	№	Контролируемая среда или продукт
1	Воздух помещения	8	Зерно
1	Семена подсолнечника	9	Силоса муки
2	Овощехранилище	10	Соль
3	Зерно	11	зернохранилище
4	Силоса муки	12	Фасованный сахар
5	Хмель	13	Выпечка
6	зернохранилище	14	Хлеб пшеничный
7	Фасованный сахар	15	Зерно

Контрольные вопросы:

1. Что означает относительная влажность газа?
2. Дайте определение упругости водяного пара.
3. Для какого диапазона температур можно использовать сорбционные влагомеры?
4. Поясните принцип действия сорбционных влагомеров.
5. В чем заключается преимущество кулонометрических гигрометров?

Литература

1. [13].
2. [22].

2.14. Практическое занятие 15. Средства визуализации данных

Содержание занятия: аналоговые и цифровые приборы, отображение информации, многоканальные микропроцессорные регистраторы, SCADA системы.

Основной материал:

Цифровые средства измерений (ЦСИ) – это измерительные приборы или измерительные устройства, предусматривающие либо цифровой отсчет показаний, либо цифровое преобразование измерительной информации:

- ЦИУ (ЦИП) - цифровые измерительные устройства (приборы);
- ИВК – информационные вычислительные комплексы;
- АЦП – аналого-цифровые измерительные преобразователи;
- ЦАП – цифро-аналоговые измерительные преобразователи.

Для большинства цифровых средств измерений характерно линейное преобразование измеряемой величины, т.е. показание ЦСИ пропорционально числовому значению измеряемой величины или ее отклонению от заданного, например, значения. Различают однопредельные, многопредельные и комбинированные ЦСИ для прямых, косвенных или совокупных измерений.

Обобщенная структурная схема ЦСИ (рисунок 43) включает аналоговый преобразователь (АП) входной величины, квантователь (КВ), преобразователь (ПК) и отсчетное устройство (ОУ).

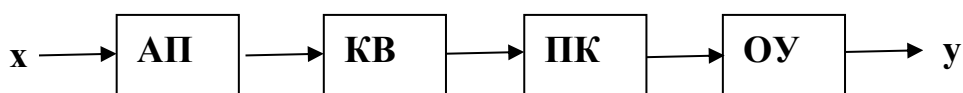


Рисунок 43. Блок-схема ЦСИ

Для упрощения на схеме рисунка 43 не показаны блоки синхронизации, управления, памяти и другие блоки, устройства для обеспечения заданного качества работы ЦСИ. Отметим лишь, что квантователь осуществляет квантование входного аналогового сигнала по уровню (или по времени). В общем случае ЦСИ производит над измеряемой величиной три операции: квантование по уровню, дискретизацию времени и кодирование. Дискретизация по времени заключается в том, что измерение производится периодически (дискретно) в моменты времени, задаваемые, например, генератором цикла. Интервал времени от момента подачи входного сигнала до момента получения кодов называется временем цикла.

Принцип действия ЦСИ определяется принципом действия его квантователя: время-импульсное ЦСИ имеет квантователь интервала времени; частотно-импульсное ЦСИ имеет квантователь частоты; кодо-импульсное (или поразрядного уравнивателя) ЦСИ содержит квантователь постоянного тока или напряжения. Встречаются и комбинации квантователей.

В общем случае показание отсчетного устройства ЦСИ

$$y = qU, \quad (40)$$

где q – шаг (квант, ступень) квантования в единицах измеряемой величины.

Константа q – важнейшая метрологическая характеристика ЦСИ, устанавливающая связь между измеряемой величиной x и выходным кодом и определяющая чувствительность ЦСИ ($S=1/q$). Величину q называют номинальной ценой единицы наименьшего (младшего) разряда кода (ЕМР).

$$q = k 10^m, \quad (41)$$

где $k=1, 2$ или 5 ; m – любое целое число (положительное или отрицательное) или нуль.

В любом ЦСИ предусмотрено определенное количество десятичных разрядов, каждый из которых реализует возможные состояния входного сигнала, соответствующие цифрам от 0 до 9. Тогда максимальное число $N_{\max}$, которое может индизироваться на ОУ, при трех разрядах составляет 999, при четырех – 9999 и т. д. По аналогии со стрелочными средствами измерения число $N_{\max}$ называют длиной цифровой шкалы.

Количество квантов N_q совпадает с $N_{\max}$ при $k=1$.

В общем случае $N_q = N_{\max}/k$ и число N_q называют разрешающей способностью ЦСИ, которую обозначают в виде отношения, например, 1:999.

Величина $N_{\max}$ определяется разрядностью ЦСИ и при полном использовании старшего разряда

$$N_{\max} = c^n - 1, \quad (42)$$

где c – основание системы счисления; n – число разрядов. Например, при $c = 10$ и $n=4$ $N_{\max} = 10000 - 1 = 9999$.

При заданной верхней границе $x_{\max}$ диапазона измерений

$$N_{\max} = \frac{1}{q} x_{\max} \quad (43)$$

При анализе погрешностей измерения ЦСИ рассматривают два режима статический и динамический.

Погрешность измерения в динамическом режиме зависит не только от свойств ЦСИ, но и от свойств измеряемого сигнала, к примеру частотного спектра изменений $x_{\text{вх}}$, подаваемого на ЦСИ. Поэтому для описания влияния динамических свойств ЦСИ на погрешность измерения в динамическом режиме понятие динамической погрешности не используют, а рассматривают только динамические характеристики самого ЦСИ, в частности, его переходную характеристику.

Основная метрологическая характеристика линейного ЦСИ – номинальная функция преобразования

$$y = k_S x, \quad (43)$$

где $k_S = \text{const}$ – номинальный коэффициент преобразования. Почти все ЦСИ выполняют так, что $k_S = 1$.

Достоинства ЦСИ заключаются в высокой точности и помехозащищенности, представлении измерительной информации в цифровой форме.

Измерительный мост (мост Вестона) представляет собой электрическую цепь, состоящую из четырех плеч (резисторов), которые питаются от источника питания, включенного в диагональ питания a-b (рисунок 44). В измерительной диагонали моста c-d включен измерительный прибор с сопротивлением R_r (нуль-гальванометр).

Мост Вестона обладает свойством равновесия: если равны произведения сопротивлений противоположных плеч, то мост находится в равновесии и ток в измерительной диагонали отсутствует.

$$R_1 * R_2 = R_3 * R_4, I_{cd} = 0 \quad (44)$$

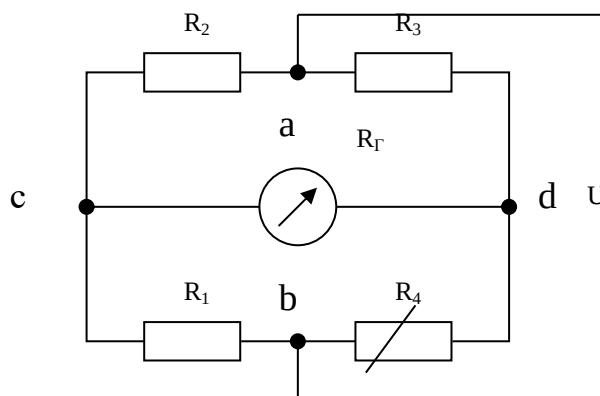


Рисунок 44 - Принципиальная схема неуравновешенного моста

Мосты делятся на неуравновешенные (когда три плеча постоянные сопротивления, а одно переменное) и уравновешенные (два плеча постоянные, два – переменные).

Неуравновешенный мост в момент измерения находится в состоянии разбаланса (неуравновешен). Неизвестное сопротивление датчика температуры R_4 определяется по величине тока в измерительной диагонали cd:

$$I = U [R_1 R_3 - R_2 R_4 / R_r (R_1 + R_2) + R_1 R_2 (R_3 + R_4) + R_3 R_4 (R_1 + R_2)] \quad (45)$$

Исходя из уравнения (45), условием точного измерения для неуравновешенного моста будет постоянство напряжения питания схемы U :

$$U = \text{const} \quad (46)$$

Поэтому неуравновешенные мосты (в цифровых приборах) должны запитываться стабилизированным напряжением постоянного тока для того, чтобы выходной ток зависел только от сопротивления датчика R_4 :

$$I = f(U, R_4) \quad (47)$$

Уравновешенный мост (рисунок 45) в момент измерения должен быть всегда уравновешен с помощью второго переменного сопротивления R_3 , называемым *реохордом* (калиброванное проволочное сопротивление с подвижным контактом).

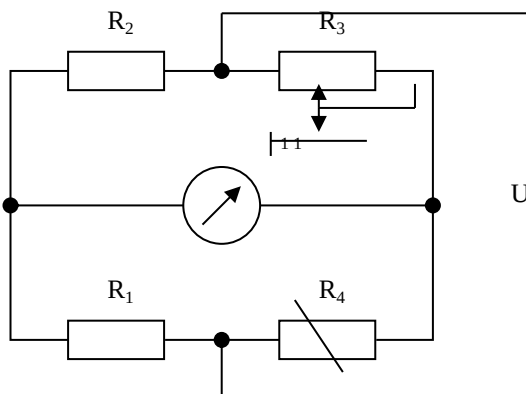


Рисунок 45 - Принципиальная схема уравновешенного моста

Уравнение измерения уравновешенного моста получают решением уравнения равновесия (44) относительно неизвестного сопротивления (датчик) R_4 :

$$R_4 = \frac{R_1}{R_2} * R_3 - 2R_{\text{л}} \quad (48)$$

В уравнении (48) напряжение питания отсутствует, значит оно не влияет на показания прибора. Поэтому питание измерительной схемы в уравновешенных мостах выполняется переменным пониженным напряжением промышленной частоты (6,3 В), что является достоинством этих приборов. Мостовые измерительные схемы применяются для измерения температуры в комплекте с термометром сопротивления, включенным в одно из плеч моста.

Автоматический уравновешенный мост (рисунок 46) осуществляет автоматическое уравновешивание путем изменения сопротивления плеч. Если потенциалы диагонали cd не равны, то сигнал с измерительной диагонали поступает на электронный усилитель (ЭУ). Выходной сигнал ЭУ приводит в движение реверсивный двигатель (РД), который перемещает движок реохорда R_p до тех пор, пока не наступит новое равновесие моста. Сопротивление R_p рассчитано таким образом, что при изменении температуры от минимального значения до максимального движок реохорда перемещается от одного крайнего положения до другого. Параметр m определяет положение движка в долях от R_p .

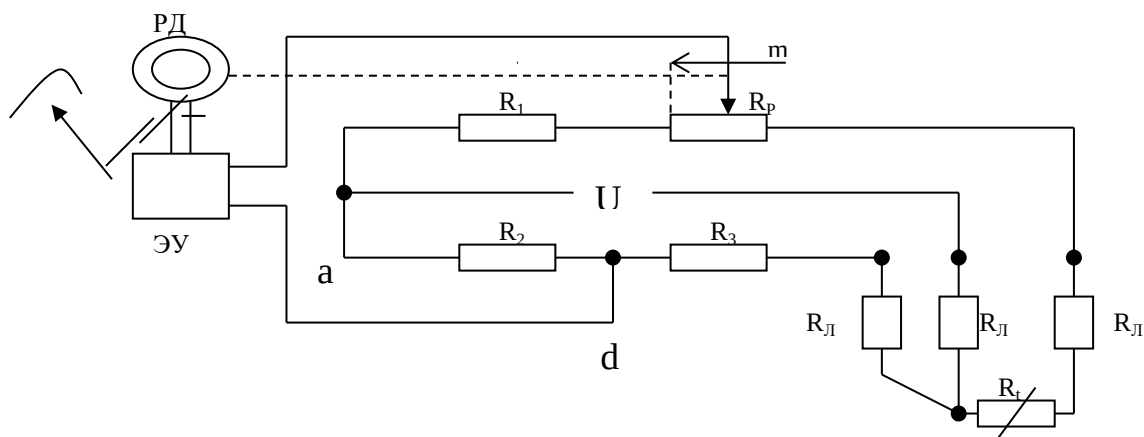


Рисунок 46 - Автоматический уравновешенный мост с трехпроводной схемой включения ТС

Трёхпроводная схема включения датчика позволяет исключить температурную погрешность, т.к. сопротивления подводящих проводов ($R_{\text{л}}$) окажутся как в правой, так и в левой частях уравнения равновесия.

$$m = \Delta R_t [R_2 / R_p (R_2 + R_3)] \quad (49)$$

Основным недостатком приведенной схемы является низкая точность на границах диапазона, невозможность измерения малых сопротивлений, громоздкость, наличие механических узлов. *Классы точности приборов* составляет 0,25 и 0,5.

Расчет измерительной схемы автоматического уравновешенного моста (рисунок 47) рассмотрим на конкретном примере:

Исходные данные:

НСХ термометра сопротивления 50М;

Диапазон измерений: $t_n = -50^\circ \text{C}$, $t_k = 180^\circ \text{C}$ показаний прибора;

Относительное сопротивление термометра $\beta = \frac{R_{100}}{R_0} = 1.426 \pm 0.001$; $R_0 = 50 \text{ Ом}$;

$R_{\text{т.н.}} = 42 \text{ Ом}$; $R_{\text{т.к.}} = 94 \text{ Ом}$;

Цель расчета: определить значения сопротивлений измерительной схемы.

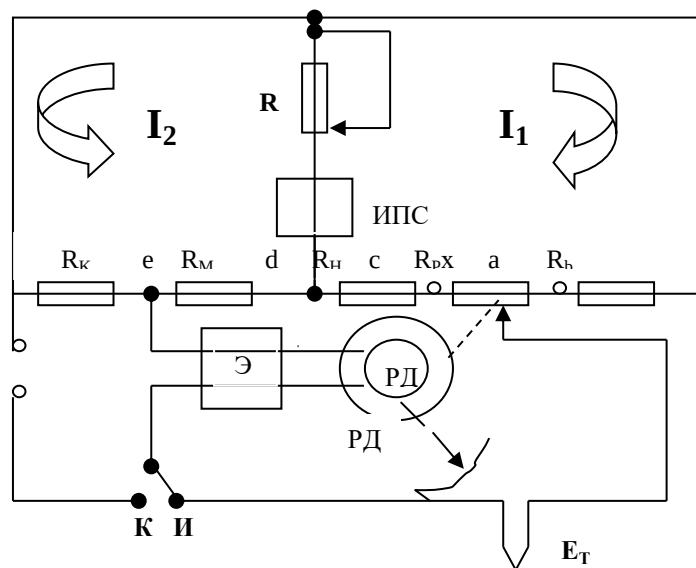


Рисунок 47 - Принципиальная схема автоматического потенциометра.

Измерение термоЭДС термопар может выполняться компенсационным методом (косвенное измерение), цифровым вольтметром (прямое измерение) или миллиамперметром после нормирующего преобразователя, преобразующего милливольтный сигнал термопары в токовый сигнал.

Электронные потенциометры предназначены для непрерывного измерения электродвижущей силы постоянного тока. При измерении температуры на вход потенциометра подключается термоэлектрический преобразователь-термопара.

Принцип действия потенциометра основан на компенсационном (нулевом) методе измерения: измеряемая термоЭДС компенсируется падением напряжения рабочего тока на реохорде от дополнительного источника.

Основное преимущество компенсационного метода заключается в том, что значение термоЭДС не зависит от сопротивления цепи термоэлектрического термометра. Уравнение измерения (компенсации): в момент компенсации произведение рабочего тока на сопротивление реохорда должно равняться термоЭДС.

$$E(t, t_0) = I * R_{px}, \quad (50)$$

При условии постоянства рабочего тока I измеряемая термоЭДС определяется по значению сопротивления реохорда R_{px} .

ТермоЭДС термоэлектрического термометра E_T компенсируется падением напряжения на участке $б-е$ автоматически. Если $U_{бе}$ не равно E_T , то на вход электронного блока ЭБ подается разность сигналов $\Delta U = U_{бе} - E_T$, которая усиливается. Далее сигнал поступает на реверсивный двигатель, который перемещает движок реохорда R_p таким образом, что ΔU начинает

уменьшаться и становится равным нулю, после чего выходной сигнал ЭБ не будет вызывать движения реверсивного двигателя и движок реохорда остановится. Вместе с перемещением движка реохорда по шкале прибора одновременно перемещается стрелка, отмечая показания измеряемой температуры. Источник питания стабилизированный *ИПС* используется для стабилизации рабочего тока.

Для автоматического введения поправки на температуру холодного спая термоэлектрического термометра в схеме потенциометра имеется медный резистор (R_M), который расположен рядом с холодным спаем термопары и имеет ту же температуру, что и он. Из схемы видно, что медный резистор и измерительный реохорд включены в разные контуры с различными по направлению и значению рабочими токами ($I_1=3$ мА; $I_2=2$ мА). Это сделано для того, чтобы ввести поправку в показания на температуру холодного спая и уравновесить термоЭДС.

Регистратор-видеограф Элметро-ВиЭР-10,4 (рисунок 48) предназначен для преобразования, регистрации и отображения измерительной информации, принимаемой по нескольким каналам. Регистратор предназначен для замены бумажных самописцев и может выступать как система сбора и передачи данных в систему управления, т.к. имеет интерфейс с внешней сетью RS-485 (ModBus RTU) и Ethernet (Modbus/TCP).

Регистратор обеспечивает:

- архивирование результатов преобразования входных сигналов;
- представление результатов преобразования в цифровом виде, в виде шкал, в виде графиков и отображение на графическом дисплее;
- отсутствие потери информации при неоднократном выключении/включении питания в произвольный момент времени во всем диапазоне питающих напряжений.



Рисунок 48 - Регистратор-видеограф Элметро-ВиЭР-10,4

Аналоговые входы(АВ) регистратора – универсальные и индивидуально конфигурируются на преобразование сигналов:

- термопар;
- термометров сопротивления;
- пирометров;
- силы постоянного тока;
- напряжения постоянного тока;
- сопротивления постоянному току.

Аналоговые входы с выходом питания (АП) рассчитаны на подключение следующих типов датчиков:

- датчики с выходным сигналом силы постоянного тока;
- датчики с выходным сигналом напряжения постоянного тока.

Каждый вход имеет встроенный изолированный преобразователь напряжения (20В, до 25мА) для обеспечения питания подключаемых датчиков.

Аналоговые выходы(АЕ) предназначены для преобразования заданных численных значений в аналоговый токовый сигнал и служат для подключения различных исполнительных устройств с соответствующим токовым входом.

При одновременном проектировании и управлении ТП позволяют интегрированные АСУ ТП на базе различных SCADA –систем.

Традиционно системы автоматизированного управления (САУ) промышленными комплексами было принято разделять на автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) и на автоматизированные системы управления предприятием (АСУП) [23].

На АСУТП возлагались функции оперативного управления, на АСУП – функции стратегического управления промышленным комплексом. Как правило, эти системы были мало интегрированы друг с другом и функционировали во многом автономно. В настоящее время все больше ориентируются на объединение АСУТП и АСУП в единую интегрированную САУ.

Метод создания интегрированной САУ основан на использовании готовых программных средств – специализированного базового программного обеспечения. При использовании готовых программных средств сроки создания САУ значительно сокращаются, так как нет необходимости в создании мнемосхем «с нуля». Одним из примеров готовых программных средств для создания мнемосхем промышленного комплекса является такое специализированное базовое программное обеспечение как SCADA-система.

SCADA-система- *Supervisory Control And Data Acquisition System* -

система оперативно-диспетчерского управления и сбора данных

SCADA – это специализированное базовое программное обеспечение, функционирующее в режиме реального времени и реализующее следующие задачи оперативно-диспетчерского управления:

- сбор производственных данных с удалённых объектов;
- обработка данных;
- хранение данных;
- анализ данных;
- управление удаленными объектами.

Пример визуализации параметров технологического процесса приведен на рисунке 49.

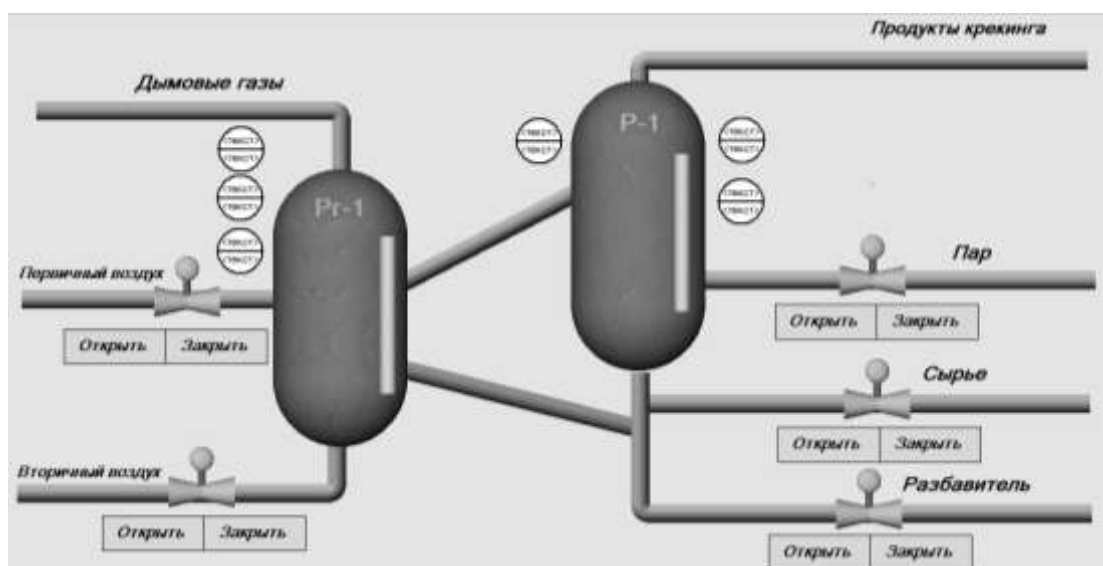


Рисунок 49 - Видеограф контроля и управления технологического процесса (SCADA TRASE MODE).

Наиболее популярные SCADA-системы, имеющие поддержку в России, приведены в таблице 20.

Таблица 20

SCADA-системы, представленные на российском рынке

SCADA	Фирма-изготовитель	Страна
WizconSupervisor	ELUTIONS	США
InTouch	Wonderware	США
Genesis	Iconics	США

iFIX	GE Intelligent Platforms	США
RSView32	Rockwell Software Inc.	США
RealFlex	RealFlex Technologies	США
FactoryLink	United States DATA Co.	США
Sitex/Phocus	Jade Software	Англия
WinCC	Siemens	Германия
VijeoCitect	Schneider Electric	Франция
Advantech Studio	Advantech	Тайвань
MasterSCADA	ИнСАР	Россия
КАСКАД	Каскад-АСУ	Россия
КРУГ-2000	КРУГ	Россия
TraceMode	AdAstrAResearchGroup	Россия

В АСУ ТП взаимодействие оператора – диспетчера, технолога с САУ происходит через человеко-машинный интерфейс (HMI) с помощью операторской станции и программы мнемосхемы.

МНЕМОСХЕМА – это графическая информационная МОДЕЛЬ технологического процесса, условно отображающая технологическую, функционально – техническую схему объекта управления и информирующая о его состоянии в объеме, необходимом оператору-технологу для выполнения своих функций.

Основные этапы создания мнемосхемы промышленного комплекса:

1. Анализ исходных данных
2. Создание статических элементов мнемосхемы
3. Создание базы данных параметров технологического процесса
4. Написание скриптов обработки событий
5. Анимация мнемосхемы
6. Отладка и размещение мнемосхемы

Задание 1.

Рассчитать сопротивление R_4 измерительной схемы уравновешенного моста (рисунок 46) и определить измеряемую температуру при известных параметрах датчика (термометра сопротивления) и сопротивлений схемы (таблица 21). Номер является вариантом задания.

Таблица 21

Варианты задания для расчета параметров уравновешенного моста

№	R_1	R_2	R_3	R_4	Тип датчика
1	300	300	30	5	ТСП 100П $a = 3,91 \times 10^{-3}$
2	400	400	100	2,5	
3	100	200	115	2,5	
4	200	100	130	2,5	
5	120	100	153	2,5	
6	350	300	170	2,5	
7	200	200	200	2,25	
8	300	300	100	2,5	ТСМ 100М $a = 4,26 \times 10^{-3}$
9	400	400	125	2,5	
10	200	200	142	2,5	
11	100	100	155	2,5	
12	100	100	200	2,5	
13	300	300	110	2,5	
14	200	200	170	2,5	
15	300	300	180	2,5	

Контрольные вопросы

- 1) Какая электрическая цепь соединений резисторов называется мостовой?
- 2) Какой мост Вестона называется уравновешенным?
- 3) Чем отличается схема неуравновешенного моста?
- 4) Условие равновесия мостовой измерительной схемы?
- 5) Какие преобразования аналогового сигнала происходят в цифровом приборе?

Литература

1. [22].
2. [23].

2.15. Практическое занятие 16. Исполнительные механизмы и регулирующие органы

Содержание занятия: определение и назначение исполнительного механизма (ИМ) и регулирующего органа (РО), пневматические и электрические ИМ, типы РО, критерии выбора.

Основной материал:

Исполнительные механизмы и регулирующие органы являются обязательными составляющими элементами любой САР.

Исполнительный механизм – это техническое средство автоматизации, предназначенное по команде управляющего сигнала регулятора перемещать регулирующий орган (РО). Примерами исполнительных механизмов могут служить электродвигатель электропривода, мембранный или поршневой ИМ.

Регулирующий орган – это техническое средство автоматизации, способное изменять поток вещества или энергии. Примерами РО могут являться клапан шаровой или игольчатый, одно – или двухседельный, реостат, контакты реле и др.

Регулирующий орган осуществляет регулирующее воздействие на объект изменением расхода вещества или энергии, подводимой к нему. Для изменения расхода жидкостей, газов и паров применяют дроссельные регулирующие органы. Их действие основано на изменении проходного сечения трубопровода в месте установки такого органа. Проходное сечение дроссельного регулирующего органа изменяют, открывая или закрывая его. Расход вещества через такой орган зависит от степени его открытия и перепада давлений на нем. Поэтому следует иметь в виду, что даже при одной и той же степени открытия дроссельного регулирующего органа расход через него может изменяться при изменении перепада давлений.

К числу дроссельных регулирующих органов относятся односедельные, двухседельные и диафрагмовые клапаны, а также заслонки. В односедельных и двухседельных регулирующих клапанах (рисунок 49) изменение проходного сечения производится перемещением одного или двух плунжеров относительно седла. Преимущество односедельного клапана перед двухседельным в том, что он обеспечивает при закрытии герметичное перекрытие трубопровода, в то время как у двухседельного невозможно обеспечить герметичную посадку в седла одновременно обоих плунжеров. С другой стороны, перепад давлений на клапане создает на плунжере односедельного клапана выталкивающее усилие, достигающее максимальной величины при полностью закрытом клапане. У двухседельного же клапана такие силы приложены к обоим плунжерам, но направлены в разные стороны. Поэтому результирующее усилие на штоке такого клапана даже при полном закрытии гораздо меньше, чем у односедельного, и для перемещения двухседельного клапана требуется исполнительный механизм меньшей мощности, чем для односедельного.

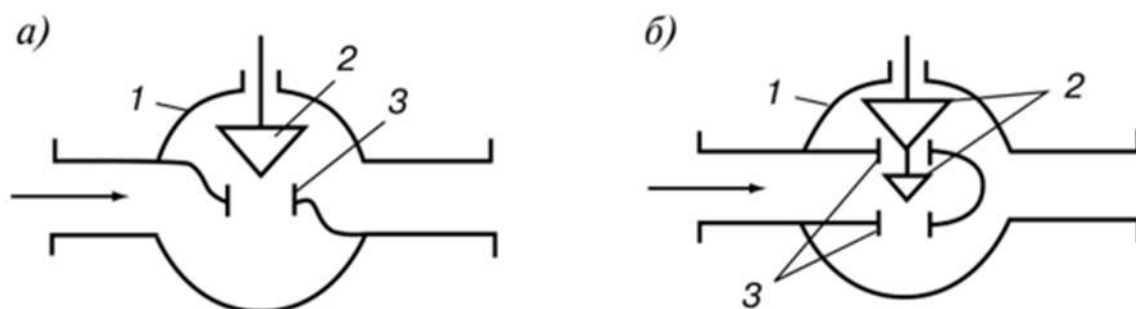


Рисунок 49 - Регулирующие клапаны:
а — односедельный; б — двухседельный; 1 — корпус; 2 — плунжер; 3 — седло

В диафрагменных клапанах (рисунок 50) проходное сечение изменяется в результате перемещения центра диафрагмы относительно перегородки в корпусе клапана.

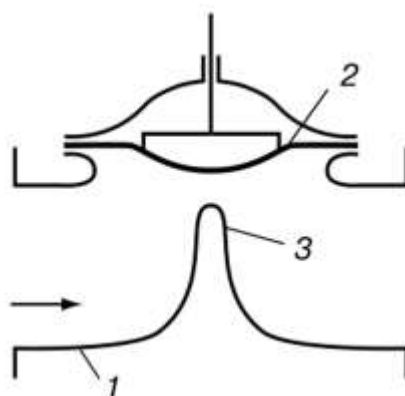


Рисунок 50 - Диафрагменный клапан:
1 — корпус; 2 — диафрагма; 3 — перегородка

В трубопроводах большого сечения для управления потоками газа и пара применяют поворотную заслонку (рисунок 51). Основным элемент заслонки — круглый диск, укрепленный на оси и помещенный в корпусе. Поворотом диска изменяется площадь проходного сечения между заслонкой и корпусом. Если диск находится в плоскости, перпендикулярной к оси корпуса, то проходное сечение равно нулю. По мере поворота диска площадь сечения увеличивается и достигает максимума, когда положение диска совпадает с осью корпуса.

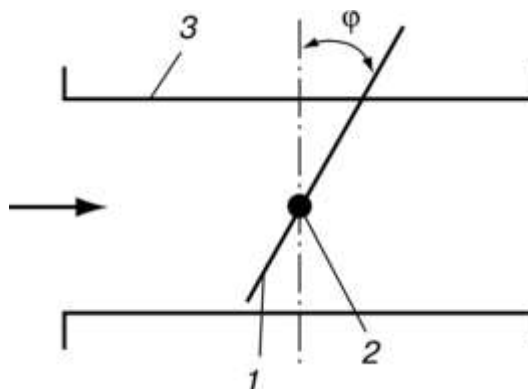


Рисунок 51. Поворотная заслонка:
1 — диск; 2 — ось; 3 — корпус

Основной характеристикой дроссельного регулирующего органа как элемента САР является его статическая характеристика — зависимость расхода вещества через регулирующий орган от степени его открытия.

Для регулирующего органа предпочтительна линейная статическая характеристика, так как только в этом случае не искажается закон регулирования, формируемый регулятором в САР. Однако, как указывалось выше, расход через дроссельный регулирующий орган зависит еще и от перепада давлений, который в технологическом процессе может изменяться с изменением расхода. Поэтому статическая характеристика регулирующего органа, линейная при постоянном перепаде давлений, может оказаться нелинейной в реальных условиях.

Чтобы избежать этого, применяют клапаны не только с линейными, но и с нелинейными характеристиками при постоянном перепаде давлений. Таким образом, удастся скомпенсировать нелинейность статической характеристики регулирующего органа, обусловленную переменным перепадом давлений.

Для дроссельных регулирующих органов необходимая статическая характеристика наиболее просто может быть получена у регулирующего клапана. В настоящее время промышленность выпускает регулирующие клапаны с линейной, логарифмической и параболической характеристиками, причем клапаны с различными характеристиками отличаются лишь формой плунжера.

Кроме статической характеристики регулирующий клапан характеризует его пропускная способность — расход воды через полностью открытый регулирующий орган при перепаде давлений на нем $1 \cdot 10^5$ Па. Этот расход (в м³/ч) указывается в паспортных данных регулирующего органа вместе с другими его показателями — условным давлением, допустимой температурой и т.п.

Регулирующий орган выбирают по пропускной способности, виду требуемой статической характеристики, а также исходя из условий его эксплуатации: свойств протекающей среды, температуры и давления в трубопроводе.

Для трубопроводов небольшого диаметра (до 25 мм) применяют односедельные регулирующие клапаны, большого диаметра — двухседельные. В тех случаях, когда условия эксплуатации не позволяют применять регулирующие клапаны, используют диафрагменные клапаны сильноагрессивных жидкостей. Диафрагмы в таких клапанах изготавливают из кислотостойкой резины, фторопласта и других материалов, стойких по отношению к протекающей среде, а внутреннюю поверхность корпуса покрывают фторопластом или эмалью.

Исполнительный механизм преобразует выходной сигнал регулятора в перемещение регулирующего органа. По виду используемой энергии исполнительные механизмы делятся на пневматические, гидравлические и электрические. В инженерных системах наибольшее применение получили пневматические и электрические исполнительные механизмы.

Пневматические исполнительные механизмы. Эти механизмы (рисунок 52) преобразуют входное давление p в прогиб мембраны и перемещение связанного с ней штока. Мембрана (обычно резинотканевая) герметично заделана по краю между верхней и нижней крышками. Центральная часть мембраны опирается на жесткий центр. Благодаря противодействию пружины статическая характеристика исполнительного механизма, т. е. зависимость перемещения от давления p , линейна.

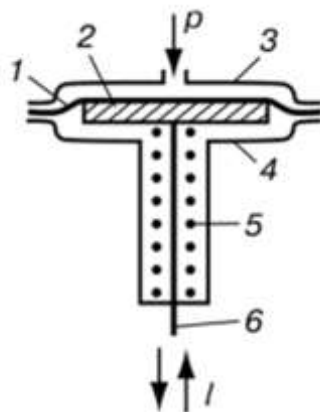


Рисунок 52 - Мембранный исполнительный механизм:
1 — мембрана; 2 — жесткий центр; 3, 4 — крышки; 5 — пружина;
6 — шток

Обычно пневматические исполнительные механизмы применяют для управления регулирующими клапанами и их выпускают как одно устройство — пневматический регулирующий клапан. Имеются два вида пневматических регулирующих клапанов: нормально открытые (НО) и нормально закрытые (НЗ).

У первых (рисунок 53 а) при отсутствии давления воздуха над мембраной шток под действием пружины переходит в крайнее верхнее положение и плунжер при этом полностью открывает клапан. С повышением давления воздуха проходное сечение такого клапана уменьшается. У вторых (рисунок 53 б) при отсутствии давления воздуха проходное сечение

полностью перекрыто и клапан открывается лишь при появлении давления над мембраной.

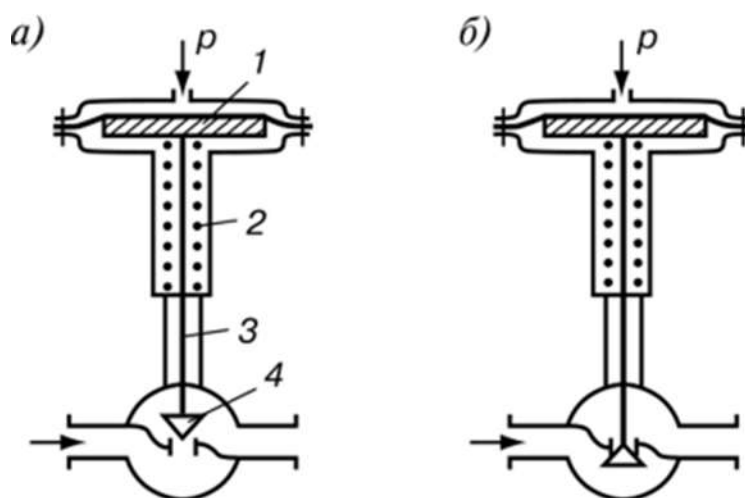


Рисунок 53 - Пневматический регулирующий клапан:
а — нормально открытый; б — нормально закрытый; 1 — мембрана; 2 — пружина; 3 — шток; 4 — плунжер

Электрические исполнительные механизмы должны обеспечивать перемещение регулирующего органа по командам, поступающим от электрического регулятора при автоматическом управлении или от оператора при ручном дистанционном управлении. При поступлении команды исполнительный механизм перемещается с постоянной скоростью. Однако благодаря импульсному режиму работы средняя скорость выходного вала исполнительного механизма оказывается переменной. Различные типы исполнительных механизмов отличаются величиной крутящего момента на выходном валу и скоростью его поворота при включенном электродвигателе.

В состав электрического исполнительного механизма (рисунок 54) обычно входят следующие основные элементы: реверсивный электродвигатель, ручной привод, концевые и путевые выключатели, тормозное устройство и датчик положения выходного вала. Электродвигатель с редуктором служит для преобразования электрической энергии в механическую, достаточную для перемещения регулирующего органа. Маховик необходим для перемещения выходного вала исполнительного механизма вручную при выходе из строя тиристорного пускателя или электродвигателя.

В исполнительном механизме имеются вспомогательные устройства, обеспечивающие преобразование угла поворота выходного вала в электрические сигналы различного назначения. Дифференциально-трансформаторный преобразователь служит для введения в регулятор сигнала обратной связи, пропорционального углу поворота выходного вала

исполнительного механизма или, что то же самое, степени открытия регулирующего органа.

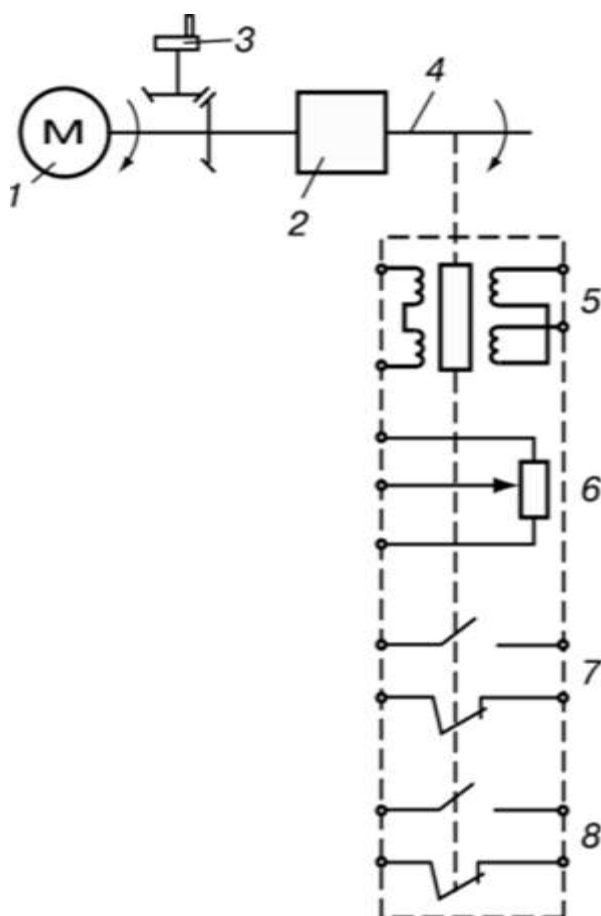


Рисунок 54 - Электрический исполнительный механизм:

- 1 — электродвигатель;
- 2 — редуктор; 3 — маховик;
- 4 — выходной вал исполнительного механизма;
- 5 — дифференциально-трансформаторный преобразователь;
- 6 — реостатный преобразователь;
- 7 — концевые выключатели;
- 8 — путевые выключатели.

Выходной сигнал реостатного преобразователя используется для работы дистанционного указателя положения исполнительного механизма, устанавливаемого на щите оператора рядом с кнопками ручного дистанционного управления. Концевые выключатели выполняют защитные функции.

Они отключают тиристорный пускатель при достижении регулирующим органом крайних положений. Путевые выключатели служат для ограничения диапазона перемещения регулирующего органа. В автоматическом режиме работы они отключают пускатель при выходе за пределы установленного диапазона.

Тормозное устройство в таких механизмах необходимо для уменьшения выбега выходного вала после прекращения действия управляющих импульсов. Обычно тормозное устройство снабжается электромагнитным приводом, который работает следующим образом: при появлении силового напряжения на электродвигателе появляется ток и в обмотке электромагнита. Якорь втягивается и отводит тормозную колодку от вала электродвигателя. При исчезновении силового напряжения электромагнит обесточивается и вал электродвигателя тормозится колодкой, которая прижимается к нему пружиной.

Расчет и выбор типа и размера РО

Выберем типоразмер регулирующего органа для РО

$$n = \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{Л}}}{\Delta P_{\text{РО}}}}; \quad (51)$$

$$\Delta P_{\text{Л}} = \xi * \frac{\omega^2}{2} * \rho * 10^6 = 1,077 * 10^{-3} \text{ Па};$$

$$\xi = \lambda_T * \frac{5}{50} = 1,356 * 10^{-3};$$

$$n = \sqrt{\frac{1,077 * 10^{-3}}{1,6}} = 0,026;$$

Если $n < 1,2$, то пропускная характеристика линейна.

Проверка расчетов:

Определение потерь давления в трубопроводной линии и перепада давления на регулирующем органе:

$$P_1 = \sqrt{P_H^2 - 4,63 * 10^{-5} * Q_{\text{max}}^2 * \rho * T_1 * \xi_H^{np}}; \quad (52)$$

$$P_H^2 = 9$$

$$P_1 = \sqrt{9 - 4,63 * 10^{-5} * 61,30 * 1,293 * 300 * 3,555 * 10^{-7}} = 3 \text{ МПа};$$

$$P_2 = \sqrt{P_K^2 + 4,63 * 10^{-5} * Q_{\text{max}}^2 * \rho * T_1 * \xi_H^{np}};$$

$$P_K^2 = 1,96$$

$$P_2 = \sqrt{1,96 + 4,63 * 10^{-5} * 61,30 * 1,293 * 300 * 3,555 * 10^{-7}} = 1,4 \text{ МПа};$$

$$\Delta P_{\text{РО}} = P_1 - P_2;$$

$$\Delta P_{\text{РО}} = (3 - 1,4) = 1,6 \text{ МПа};$$

Определим пропускную способность для среды

$$K_{v \text{ max}} = \frac{Q_{\text{MAX}}}{2680 * P_1} * \sqrt{\rho_n * T_1 * K'}; \quad (53)$$

Для воздуха критическая температура и критическое давление, чтобы выразить K' .

$$P_{\text{кр}} = 0,38 \text{ МПа}; \quad T_{\text{кр}} = 133 \text{ К};$$

$$T_{np} = \frac{T}{T_{кр}} = \frac{300}{133} = 2,256$$

$$P_{np} = \frac{P}{P_{кр}} = \frac{3}{0,38} = 7,895$$

$$1 \leq P_{кр} \leq 10;$$

$$K' = 671,371;$$

Определение предварительного значения пропускной способности

$$K_{v\max} = \frac{7,83}{2680 * 3} * \sqrt{1,293 * 300 * 500,394} = 0,497;$$

$$K_{vy} = \eta * K_{v\max};$$

$$\eta = 1,25;$$

$$K_{vy} = 0,621;$$

Так как диаметр трубопровода равен $D_y = 50\text{мм}$, то условная пропускная способность будет равна $K_{vy} = 0,621$. Этому значению соответствует «угловой и проходной клеточно-плунжерный клапан КМР». Его характеристики даны в таблице 22.

Таблица 22

Характеристики клапана

Материал корпуса:	Сталь легированная, молибденсодержащая 10X17H13M2T, нержавеющая 12X18H10T, углеродистая;
Тип присоединения:	Под приварку, фланцевое соединение;
Рабочая среда:	Агрессивные среды, газообразные среды, нефтепродукты;
Температура среды:	От -90 до 650;
Способ управления:	Под электропривод;
Климат:	УХЛ;

$$\sigma_{\max} = \frac{K_{v\max}}{K_{vy}}; \quad (54)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{0,497}{0,621} = 0,8;$$

Рассчитаем относительный расход при ($n=0,026$):

$$q_{\max} = \sigma_{\max} \sqrt{\frac{1+n^2}{1+n^2 * \sigma_{\max}^2}}; \quad (55)$$

$$q_{\max} = 0,080 \cdot \sqrt{\frac{1 + 0,026^2}{1 + 0,026^2 * 0,80^2}} = 0,80;$$

$$q_{\min} = \sigma_{\max} * \frac{Q_{\min}}{Q_{\max}};$$

$$q_{\min} = 0,8 * \frac{4,55}{7,83} = 0,465;$$

$$\sigma_{\text{MIN}} = \frac{q_{\text{min}}}{\sqrt{1+n^2-q_{\text{min}}^2*n^2}} \quad (56)$$

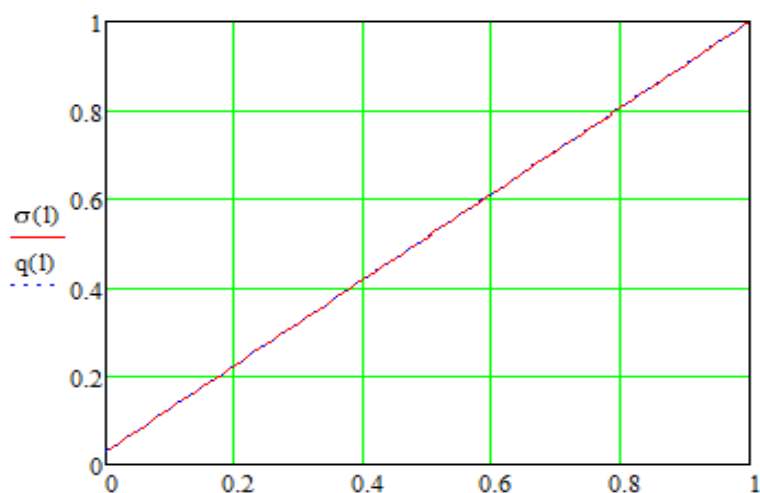
$$\sigma_{\text{MIN}} = \frac{0,465}{\sqrt{1+0,026^2-0,465^2*0,026^2}} = 0,465$$

Значение относительного хода затвора при $\sigma_0 = 0,01 \div 0,05$ находим как:

$$\begin{aligned} l_{\text{MAX}} &= \sigma_{\text{MAX}} = 0,8; \\ l_{\text{MIN}} &= \sigma_{\text{MIN}} = 0,465; \\ \Delta l &= l_{\text{MAX}} - l_{\text{MIN}}; \\ \Delta l &= 0,8 - 0,465 = 0,335; \end{aligned}$$

Для построения расходной характеристики (рисунок 54) необходимо рассчитать следующие величины:

$$\begin{aligned} K_{\text{PO}}^{\text{расч}} &= \frac{q_{\text{max}} - q_{\text{min}}}{l_{\text{max}} - l_{\text{min}}}; & K_{\text{PO}}^{\text{расч}} &= \frac{0,8 - 0,465}{0,8 - 0,465} = 1; \\ \sigma_0 &:= 0.03 \\ l &:= 0,01 \dots 1 \\ n &:= 0.026 \\ \sigma(1) &:= \sigma_0 + (1 - \sigma_0) * 1 \\ q(1) &:= \sqrt{\frac{1+n^2}{n^2 + \frac{1}{(\sigma(1))^2}}} \\ K_{\text{PO}}(1) &:= (1 - \sigma_0) * \sqrt{\frac{1+n^2}{(1+n^2*\sigma(1)^2)^3}} \end{aligned} \quad (57)$$



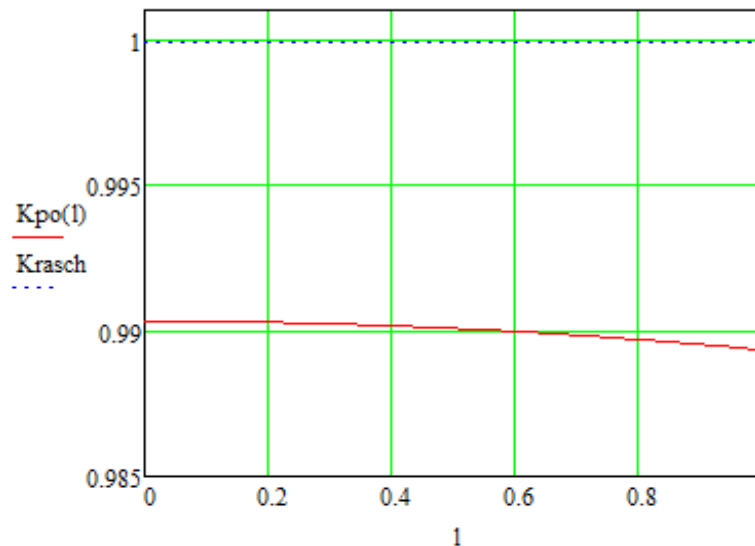


Рисунок 54 - Расходная характеристика

$$\begin{aligned}
 l &:= 0.8 \\
 K_{po}(1) &= 0.99 \\
 l &:= 0.465 \\
 K_{po}(1) &= 0.99 \\
 K_v &:= K_{po}(1) - K_{rash} = -9.814 \cdot 10^{-3} \\
 K_n &:= K_{rash} - K_{po}(1) = 9.814 \cdot 10^{-3} \\
 \delta v &:= \frac{K_v}{K_{rash}} = -9.815 \cdot 10^3 \\
 \delta n &:= \frac{K_n}{K_{rash}} = 9.815 \cdot 10^3
 \end{aligned}$$

Рассчитаем Δ при l_{MAX} и l_{MIN} :

$$\Delta K^B = 0,99 - 1 = -0,01;$$

$$\Delta K^H = 1 - 0,99 = 0,01;$$

Рассчитаем относительные отклонения коэффициента усиления:

$$\delta_K^B = \frac{\Delta K^B}{K_{рас}}; \quad \delta_K^H = \frac{\Delta K^H}{K_{рас}}; \quad (58)$$

$$\delta_K^B = \frac{-0,01}{1} = -0,01;$$

$$\delta_K^H = \frac{0,01}{1} = 0,01;$$

Выводы: По результатам расчета получена линейная расходная характеристика и отклонения коэффициента усиления находятся в пределах допусковых значений.

Задание 1.

Определить, чем являются названные элементы (РО или ИМ) при регулировании указанных в таблице 23 технологических сред. Номер является вариантом задания.

Таблица 23

Варианты задания для выбора РО и ИМ

№	Наименование элемента	Среда	№	Наименование элемента	Среда
1	поршень	воздух	8	Игольчатый вентиль	Лимонная кислота
2	мембрана	Лимонная кислота	9	поршень	мазут
3	электродвигатель	мазут	10	Шаровой клапан	вода
4	Шток и плунжер	вода	11	Катушка реле	пиво
5	заслонка	пульпа	12	Контакты реле	дрожжи
6	электроконтакт	ток	13	Твердотельное реле	сусло
7	реостат	ток	14	поршень	
			15	мембрана	Жидкий аммиак

Контрольные вопросы

- 1) Какие функции исполнительный механизм выполняет в структуре системы автоматизированного регулирования?
- 2) Классификация исполнительных механизмов.
- 3) Как выбрать регулирующий орган?
- 4) Что такое пропускная способность регулирующего органа?
- 5) Какие преимущества имеют электрический и пневматический исполнительные механизмы?

Литература

1. [13].
2. [25].

2.16. Практическое занятие 17. Микроконтроллеры

Содержание занятия: определение и назначение микроконтроллера в системе регулирования; требования к МК и ПЛК; критерии выбора.

Основной материал: в системах контроля и управления пищевыми технологиями микроконтроллеры (МК, ПЛК) являются цифровыми многоканальными регуляторами выполняющими сбор, обработку, хранение и визуализацию измерительной информации, а, главное, управление

технологическим процессом по заранее составленной программе. Например, каскадная САР - имеет 2 контура регулирования: внешний контур с корректирующим регулятором РК и внутренний контур регулирования промежуточной регулируемой переменной F_c со стабилизирующим регулятором РС, которые реализованы в программе микроконтроллера (рисунок 55).

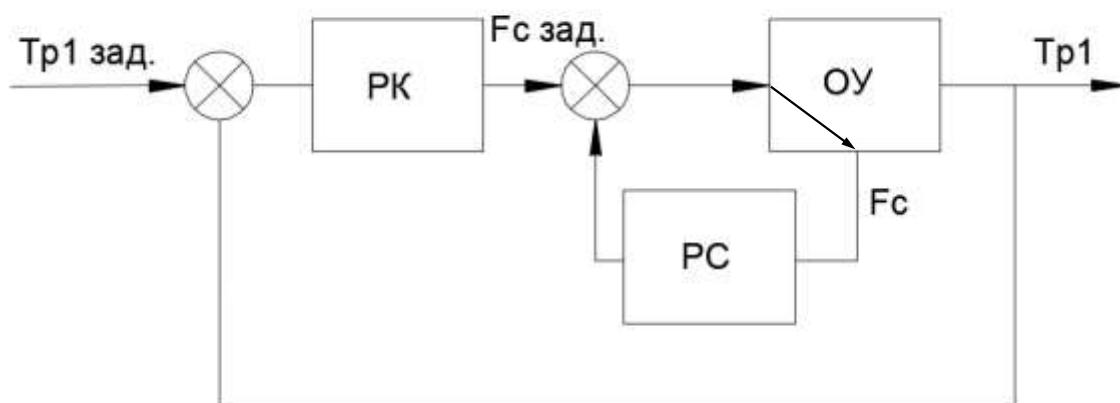


Рисунок 55– Структурная схема каскадной системы автоматического регулирования.

ОУ – объект управления; РК – регулятор корректирующий; РС – регулятор стабилизирующий; F_c – расход сырья; $F_{c \text{ зад.}}$ – задание регулятору на расход; T_{p1} – температура в объекте регулирования, основной регулируемый параметр; $T_{p1 \text{ зад.}}$ – задание регулятору по температуре

Программируемый контроллер должен отвечать таким требованиям как:

- высокая производительность;
- эффективное решение задач автоматизации среднего и высокого уровня;
- минимальное время реакции на внешние события;
- максимальная адаптация аппаратуры к требованиям решаемых задач;
- одновременное обслуживание систем локального и распределенного ввода - вывода;
- простое включение в сетевые конфигурации;
- встроенная поддержка защищенного обмена данными через промышленные сети и Интернет;
- расширенная концепция защиты доступа к программе и данным;
- свободное наращивание функциональных возможностей при модернизации системы управления.

Примером такого устройства может служить немецкий контроллер SIMATIC S7 – 1500 (рисунок 56). Он предназначен для автоматизации циклических процессов во всех секторах промышленного производства. Обмен данными осуществляется через интерфейс PROFINET в реальном

масштабе времени в режимах RT (Real Time) и IRT (Isochronous Real Time), программирования STEP 7. В сочетании с преимуществами программного обеспечения STEP 7 Professional (TIA Portal) ввод в эксплуатацию контроллера может быть выполнен легко, просто и эффективно. Конструкция контроллера отличается высокой гибкостью и удобством обслуживания. Все модули устанавливаются на профильную шину S7 – 1500 и фиксируются в рабочих положениях винтами. В одну монтажную стойку, в произвольном порядке может быть размещено до 32 модулей контроллера. Дополнительный набор модулей может устанавливаться в стойки расширения, подключаемые к контроллеру через интерфейсные модули станции ET 200MP и сеть PROFINET.



Рисунок 56 - Внешний вид программируемого контроллера SIMATIC S7-1500

Программируемые контроллеры S7-1500 (Германия) позволяют использовать в своем составе:

- Модули центральных процессоров (CPU) различной производительности, в том числе и F-CPU.
- Сигнальные модули (SM), предназначенные для ввода и вывода дискретных и аналоговых сигналов контроллера.
- Коммуникационные модули (CM/CP) для подключения контроллера к сетям Ethernet и PROFIBUS, а также поддержки обмена данными через непосредственные (PtP – point to point) соединения на основе последовательных интерфейсов RS 232 и RS 422/ RS 485.
- Технологические модули (TM) для решения задач скоростного счета и позиционирования.
- Модуль аналоговых входов AI 8 X U/I HF, разрешение 16 бит, точность 0,1%, 8 каналов (напряжение/ток) в группе из 1; тревожные сообщения; включая вводной элемент, зажим и клемму заземления (6ES7531-7NF00-0AB0)
- Модуль ввода дискретных сигналов SIMATIC S7-1500 6ES7521-1FH00-0AA0. Вид и количество выходов с втекающим током - 32. По сравнению с программируемыми контроллерами S7-300 и S7-400 в S7-1500 существенно сокращена номенклатура модулей всех типов.

Сигнальные, технологические и коммуникационные модули делятся на четыре класса:

- Модули класса HF с поддержкой диагностических функций на уровне отдельных каналов в модулях SM и TM и расширенным набором поддерживаемых функций в модулях CM и CP.
- Модули класса ST с поддержкой диагностических функций на уровне модуля или группы каналов.
- Модули класса BA без поддержки диагностических функций.
- Модули класса HS с поддержкой функций скоростного выполнения операций аналого-цифрового преобразования.

Программируемый логический контроллер российского производства ПЛК-150 (рисунок 57) имеет хорошие функциональные параметры: индикация на передней панели: питания, 6 индикаторов состояния дискретных входов, 4 индикатора состояния дискретных выходов, 1 индикатор связи с CODESYS, 1 индикатор работы программы пользователя. Имеется 6 дискретных входов. Количество дискретных выходов: 4 (э/м реле 2 А). Количество аналоговых входов: 4 (под датчики с унифицированным сигналом). Количество аналоговых выходов: 2 (ЦАП напряжение 0..10 В).



Рисунок 57 – Программируемый контроллер ПЛК-150 (ЗАО ОВЕН, РФ)

Задание 1.

Выполнить конфигурирование ПЛК -150 для заданного числа и типа входных и выходных сигналов, где буквой А – обозначаются аналоговые входные и выходные сигналы, буквой Д - дискретные (таблица 24). Номер является вариантом задания.

Таблица 24

Варианты задания по конфигурированию контроллера ПЛК-150

№	Количество входных сигналов	Количество и тип выходных сигналов	№	Количество входных сигналов	Количество и тип выходных сигналов
1	А4, Д1	А4, Д2	8	А12, Д1	А4, Д2

2	A6, Д2	A4, Д1	9	A44, Д1	A4, Д1
3	A8, Д4	A6, Д2	10	A26, Д2	A6, Д2
4	A14, Д7	A8, Д4	11	A28, Д4	A8, Д4
5	A16, Д4	A4, Д1	12	A14, Д1	A4, Д1
6	A18, Д4	A6, Д2	13	A116, Д2	A6, Д2
7	A28, Д4	A8, Д4	14	A20, Д4	A8, Д4
			15	A2, Д4	A8, Д4

Контрольные вопросы

1. Какова роль ПЛК в структуре систем контроля и управления технологическим процессом?
2. Что является входным сигналом для МК?
3. Что является выходным сигналом для МК?
4. Какими видами связи (интерфейсом) обладает МК S7-1500 фирмы Siemens?

2.17. Практическое занятие 18. Условные обозначения средств контроля и управления в проектных документах

Содержание занятия: определения, знакомство с буквенными обозначениями и графическими условными изображениями средств контроля и управления в проектах автоматизации пищевых технологий.

Основной материал:

Функциональная схема автоматизации (ФСА) - основной технический документ, определяющий функциональную структуру и объем автоматизации технологических установок.

Результатом разработки функциональных схем автоматизации являются:

- выбор методов измерения технологических параметров;
- выбор основных технических средств автоматизации;
- определение приводов исполнительных механизмов регулирующих органов технологического оборудования;
- размещение средств автоматизации на щитах, пультах, технологическом оборудовании и трубопроводах;
- определение способов представления информации о состоянии технологического процесса и оборудования.

Функциональная схема автоматизации включает:

- технологическое оборудование и коммуникации;
- технические средства автоматизации контроля, управления;
- линии связи между элементами ТСА.

Технологическое оборудование изображают на ФСА в соответствии с технологической схемой без указания оборудования и коммуникаций, которые не оснащаются техническими средствами автоматизации.

На технологических трубопроводах показывают регулируемую и запорную арматуру, которая участвует в контроле и управлении процессом.

Трубопроводные коммуникации в зависимости от транспортируемых сред изображают в соответствии с ГОСТ 14202-69. Трубопроводы промышленных предприятий [1].

Нумерация всех агрегатов, узлов, измерительных преобразователей по принятой стандартной схеме является обязательной, поэтому в тексте необходимо эту нумерацию соблюдать, например: смесительная машина 2, насос 4, уровнемер (поз.5а) и т.д. Чертеж должен содержать спецификацию оборудования (таблица 25).

Таблица 25

Пример оформления спецификации технологического оборудования

Позиция	Наименование	Количество	Примечание
1	2	3	4

Всем элементам одного измерительного канала присваивается одно цифровое значение (номер позиции). Если в измерительную цепь входит больше одного измерительного преобразователя или измерительного устройства, то рядом с цифрой номера позиции ставится цифра или буква номера подпозиции. Например, 1а, 1б или 22-1, 22-2. Номера позиции и подпозиции обозначаются цифрами высотой 3 мм внизу окружности условного обозначения элемента схемы.

Толщина линий, используемых в графических условных обозначениях на схемах, составляет (мм):

- приборы и средства автоматизации -0,5–0,6 (b);
- горизонтальная разделительная черта внутри щитов и пультов, а также линия связи – 0,2–0,3 (b/2);
- контуры технологического оборудования и трубопроводные коммуникации – 0,2–0,3(b/2);
- контуры технологического оборудования и трубопроводные коммуникации – 0,6–1,5.

Все трубопроводы должны иметь надписи материальных потоков, например: *вода, пар* и т. д.

В нижней части функциональной схемы АСУ ТП приводят прямоугольники, условно изображающие пункты контроля, щиты, пульты управления, в которых условными обозначениями показывают соответствующую аппаратуру и средства измерения. Они располагаются в следующей последовательности:

- приборы местные (установленные без шкафов и щитов, например, дифманометры расходомеров переменного перепада давления);
- агрегатные щиты, на которых размещаются все приборы и преобразователи на данный технологический агрегат;

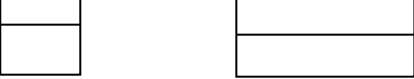
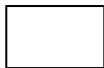
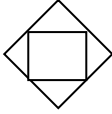
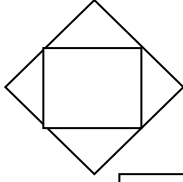
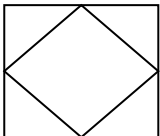
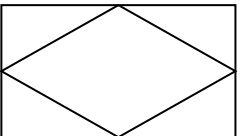
- центральный щит или пульт (иногда он же является щитом оператора) на какой-либо технологический участок, цех;
- микроконтроллер, АРМ;
- SCADA (система сбора и визуализации данных).

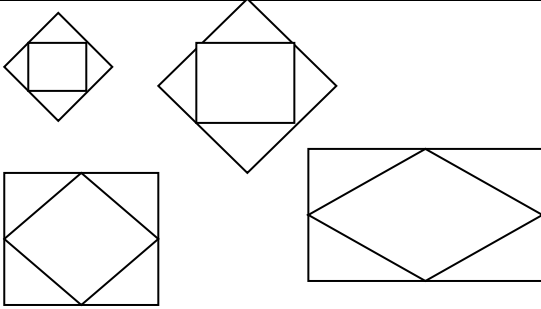
При выполнении функциональных схем в некоторых случаях применяется размещение условных изображений элементов измерительной аппаратуры вблизи мест их действительной установки – у технологических агрегатов или трубопроводов (упрощенный способ). Такое изображение обычно употребляется в том случае, когда плотность схемы очень большая и дополнительные линии затрудняют её чтение.

Условные графические обозначения приборов, средства автоматизации должны соответствовать ГОСТ 21.208-2013 [2] и обозначениям, приведенным в таблице 26.

Таблица 26

Условные обозначения ТСА в схемах АСУТП

Наименование	Обозначение
1 Прибор, аппарат, устанавливаемый вне щита (по месту): а) основное обозначение б) допускаемое обозначение	а)  б) 
2 Прибор, аппарат, устанавливаемый на щите, пульте: а) основное обозначение б) допускаемое обозначение	а)  б) 
3 Функциональные блоки цифровой техники (контроллер, системный блок, монитор, устройство сопряжения и др.)	
4 Прибор, устройство ПАЗ, установленный вне щита а) основное обозначение б) допускаемое обозначение	   

4	Прибор (устройство) ПАЗ, установленный вне щита	
	а) основное обозначение	
	б) допускаемое обозначение	
5	Исполнительный механизм. Общее обозначение	

В таблице 27 представлены символьные обозначения измеряемых величин и выполняемых функций.

Таблица 27

Символьные обозначения измеряемых величин и выполняемых функций

Буквенное обозначение	Основное значение	Дополнительное значение
A	Анализ Величина, характеризующая качество: состав, концентрация. детектор дыма	Сигнализация (отображение информации)
B	Пламя, горение	
C	Регулирование, управление	-
D	Плотность	Разность, перепад, отклонение от заданной вел-ны
E	Напряжение	Первичный измерительный преобразователь (датчик), Чувствительный элемент
F	Расход	Соотношение, доля, дробь
G	Размер, положение, перемещение	Первичный показывающий прибор
H	Ручное воздействие	Верхний предел измеряемой величины
I	Ток	Вторичный показывающий прибор
J	Мощность	Автоматическое переключение, обегание (уточнение)
K	Время, временная программа	
L	Уровень	Нижний предел измеряемой величины
M	+ (Влажность)	Величина или среднее положение (между верхним <i>H</i> и нижним <i>L</i>)
N	+	
O	+	
P	Давление, вакуум	Пневматический сигнал
Q		Суммирование по времени

		(уточнение)
R	Радиоактивность	Регистрация (отображение информации)
S	Скорость, частота	Включение, отключение, переключение, блокировка Самосрабатывающее устройство безопасности
T	Температура	Преобразование
U	Несколько разнородных измеряемых величин	-
V	Вибрация	-
W	Масса, вес, сила	-
X	Нерекомендуемая резервная буква	Вспомогательные компьютерные устройства
Y	Событие, состояние(5.7)	Вспомогательное вычислительное устройство (5.11.6)
Z	Размер, положение	Система инструментальной безопасности. ПАЗ (5.9)

Буквенные обозначения содержат информацию о виде измеряемого технологического параметра (температура, давление и т.д.) и функциональных возможностях средства измерения или управления (показывающий, регистрирующий, регулирующий прибор или измерительный преобразователь).

Порядок расположения буквенных обозначений принимают с соблюдением последовательности обозначений, приведенной на рисунке 58.

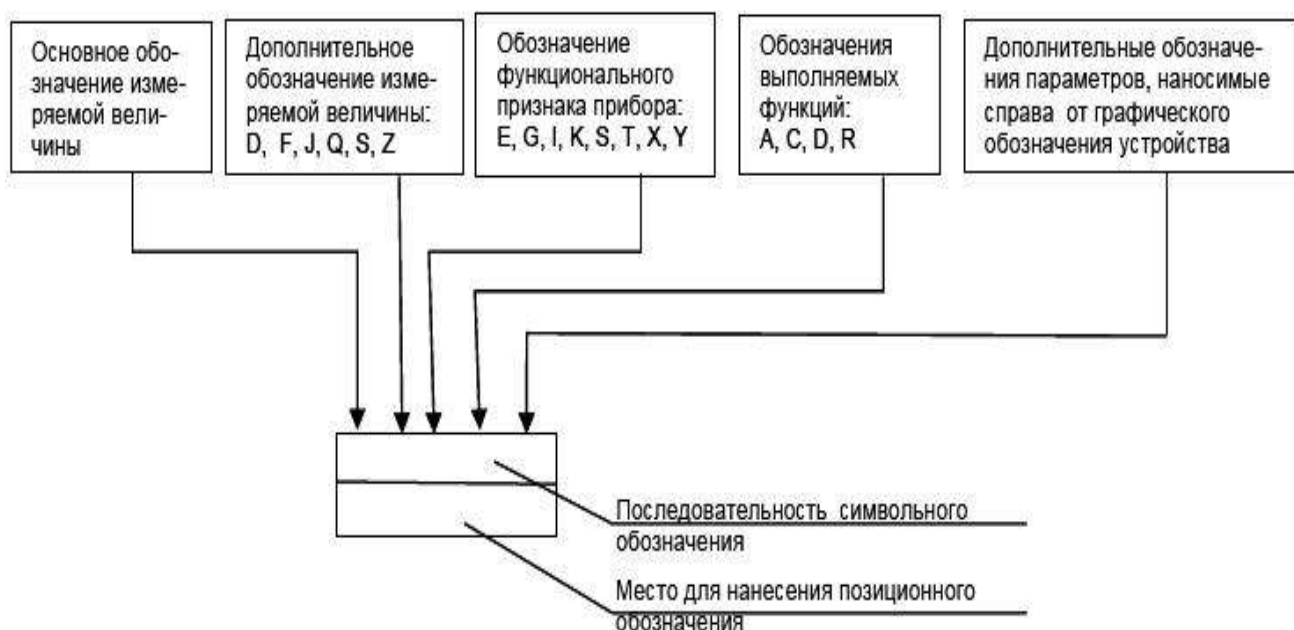


Рисунок 58 - Принцип построения условного обозначения прибора

На первом месте ставится буква латинского алфавита, обозначающая технологический параметр. На втором месте может стоять буква, уточняющая параметр, далее – функции ТСА.

Контрольные вопросы:

- 1) Что означает понятие «Функциональная схема автоматизации»?
- 2) Что включает функциональная схема автоматизации?
- 3) Какой документ определяет правила нанесения условных графических обозначений приборов, средств автоматизации?
- 4) В какой последовательности изображаются технические средства автоматизации в нижней части функциональной схемы АСУ ТП?
- 5) Какую информацию содержат буквенные обозначения технических средств автоматизации?

Литература

1. [2].
2. [3].
3. [12].
4. [24].
5. [25].

Заключение

В результате выполнения индивидуальных заданий по каждой теме теоретического и практического содержания, самостоятельной работы с рекомендуемыми источниками магистранты должны приобрести профессиональные компетенции в области современных средств контроля и управления технологических процессов в фармацевтической промышленности; навыки расчета измерительных схем и обоснования выбора информационно-измерительных устройств; знания относительно принципа действия, метрологических характеристик, устройства, области применения и методов поверки анализаторов количественного и качественного анализа.

Список рекомендуемой литературы

1. ГОСТ 14202-69. Трубопроводы промышленных предприятий. Опознавательная окраска, предупреждающие знаки и маркировочные щитки
2. ГОСТ 21.208-2013 СПДС. Автоматизация технологических процессов. Обозначения условные приборов и средств автоматизации в схемах.
3. ГОСТ 21.404-85 (2009). Приборы и средства автоматизации. Обозначения условные в схемах автоматизации технологических процессов.
4. ГОСТ 8.568-2005. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 5. Методика выполнения измерений (с поправкой).
5. ГОСТ Р 8.585-2001 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200028583>
6. Грунин В. К. Источники и приемники излучения [Текст] : учебное пособие / В. К. Грунин ; Минобрнауки, Санкт-Петербургский гос. электротехнический ун-т "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2015. - 166 с.
7. ГСССД 2-77. Таблицы стандартных справочных данных. Вода. Плотность при атмосферном давлении и температурах от 0 до 100 °С.
8. Иванова Г. М. Теплотехнические измерения и приборы : учеб. для теплоэнерг. специальностей вузов / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов, В. С. Чистяков. Изд-во М.: МЭИ. 2005. - 460 с.
9. Ившин В.П., Перухин М. Ю. Современная автоматика в системах управления технологическими процессами. М.: Инфа-М. 2013.-400 с.
10. Измерение расхода. Emerson. URL: <https://emerson.ru/ru-ru/automation/measurement-instrumentation/flow-measurement>
11. Измерение уровня. Emerson. URL: <https://www.emerson.ru/ru-ru/automation/measurement-instrumentation/level>
12. Ключев А.С. Проектирование АСУ ТП. Справочник проектировщика. М.: Энергия. 1990. – 400 с.
13. Кулаков М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств. М.: Машиностроение, 2008.-423 с.
14. Методы и средства измерений, испытаний и контроля : учебное пособие. В 5 ч. / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев. Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ. 2011. Ч. 1. – 104 с.
15. Метрология, стандартизация, сертификация : учебник для вузов / С.В. Пономарев, Г.В. Шишкина, Г.В. Мозгова. Тамбов: Изд-во ГОУ ВПО ТГТУ. 2010. – 96 с.
16. Михайлов Б.Н., Половнева С.И., Минаева Л.В. Потенциометрические методы исследования. Учебное пособие: Иркутск. 2002.-189 с.

17. Половнева С. И. Измерение расхода газов и жидкостей: учебное пособие для вузов по специальности "Автоматизация технологических процессов и производств (нефтегазовая отрасль)" направления "Автоматизированные технологии и производства" (гриф УМО) / С. И. Половнева, В. В. Ёлшин, М. Ю. Толстой. Иркутск: ИрГТУ. 2010. - 87 с.
18. Половнева С. И. Средства технологических измерений: учебное пособие / С. И. Половнева, О. В. Лазарева. Иркутск: ИрГТУ. 2015. - 71 с.
19. Половнева С.И. Анализаторы состава и качества: учебное пособие / С. И. Половнева, В. В. Елшин, А. М. Захаров. Иркутск: ИрГТУ. 2014. - 124 с
20. Рачков М. Ю. Технические измерения и приборы: учебник (для вузов по направлению подгот. дипломир. специалистов "Автоматизир. технологии и пр-во" специальности "Автоматизация технол. процессов и пр-в (в машиностроении)"). М.: МГИУ. 2007. - 199 с.
21. Сажин С. Г. Средства автоматического контроля технологических параметров: учебник по направлению подготовки "Автоматизация технологических процессов и производств" (химико-технологическая, агропромышленная отрасли). Санкт-Петербург: Лань. 2014. - 360 с.
22. Сажин С.Г. Приборы контроля состава и качества технологических сред: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Лань. 2012.-432 с.
23. Соколов В.А. Автоматизация технологических процессов пищевой промышленности. М.: Агропромиздат, 1991. - 445 с.
24. СТО ИРНИТУ 005-2020. Система менеджмента качества. Оформление курсовых проектов (работ) и выпускных квалификационных работ технических специальностей. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ. 2020. – 40 с.
25. Тематический каталог. Вып. 4, кн.1–6. Челябинск: МЕТРАН. 2014. – 700 с.
26. Фарзани Н. Г. Технологические измерения и приборы: учебник по специальности "Автоматизация технологических процессов и производства" / Н. Г. Фарзани, Л. В. Илясов, А. Ю. Азим-заде. М.: Высшая школа. 1989. - 456 с.
27. Федеральный закон от 26 июня 2008 г. N 102-ФЗ "Об обеспечении единства измерений" (с изменениями и дополнениями)/ URL: <https://base.garant.ru/12161093/>
28. Шишмарев В. Ю. Технические измерения и приборы: учебник для вузов по направлению подготовки "Автоматизированные технологии и производства" / В. Ю. Шишмарев, Изд-во: Юрайт. 2019. - 377 с.
29. Электротехника, автоматика и технические средства автоматизации : методические указания к выполнению курсовой работы / сост. В.И. Никулин, И.Э. Илюшин, Е.А. Колюкович. Могилев: МГУП, 2014.- 68 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

НСХ для термопары типа ТХК (L) при $t_0 = 0^\circ\text{C}$ (ГОСТ Р 8.585-2001)

Температура рабочего конца, $^\circ\text{C}$	Значение термоЭДС, мВ	Температура рабочего конца, $^\circ\text{C}$ (вар)	Значение термоЭДС, мВ	Температура рабочего конца, $^\circ\text{C}$	Значение термоЭДС, мВ
0	0	110 (1)	7,627	220	16,200
10	0,646	120 (2)	8,366	230	17,030
20	1,303	130 (3)	9,115	240	17,690
30	1,976	140(4)	9,865	250	17,860
40	2,658	150(5)	10,624	260	19,520
50	3,350	160(6)	11,393	270	20,360
60	4,050	170(7)	12,172	280	21,200
70	4,760	180(8)	12,961	290	22,040
80	5,469	190(9)	13,760	300	22,880
90	6,179	200(10)	14,570		
100	6,898	210(11)	15,380		

Учебное издание

Голодков Юрий Эдуардович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОИЗВОДСТВ**

Практикум

Редактор
Предпечатная подготовка