

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Методические указания к лабораторному практикуму

Иваново

2010

Министерство образования и науки Российской Федерации

Ивановский государственный химико-технологический университет

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ**

Методические указания к лабораторному практикуму

Составитель: Е.В. Ерофеева

Иваново 2010

Составитель: Е.В. Ерофеева

УДК 536.5

Системы управления химико-технологическими процессами: метод. указания к лабораторному практикуму / Сост.: Е.В. Ерофеева; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. – Иваново, 2010. – 64 с.

В методических указаниях изложены объем и порядок выполнения лабораторных работ по курсу «Системы управления химико-технологическими процессами».

Приведенные в методических указаниях теоретические введения по темам измерения температуры, расхода, уровня, давления, а также схемы установок для градуировки и поверки приборов позволяют студентам понять принцип действия и устройство важнейших измерительных приборов, используемых в химической, фармацевтической, пищевой промышленности.

Предназначены для студентов технологических специальностей как очной, так и заочной форм обучения, обучающихся по направлению «Химическая технология и биотехнология».

Табл. 10. Ил. 27 . Библиогр.: 3 назв.

Рецензент кандидат технических наук Е.М. Шадрина (Ивановский государственный химико-технологический университет).

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Системы управления химико-технологическими процессами» для студентов, обучающихся по направлению «Химическая технология и биотехнология».

В методических указаниях приведены теоретические введения по шести темам, а именно изложены вопросы измерений, измерительных приборов, подробно рассмотрены приборы для измерения температуры, давления, расхода, уровня, а также тема о типовых законах регулирования.

Изложен объем и порядок выполнения восьми лабораторных работ.

Используя данные методические указания, студенты-технологи изучают принцип действия современных приборов, применяющихся в химической, фармацевтической, отделочной, пищевой промышленности, в производстве строительных материалов и т.д. Студенты получают навык поверки и градуировки приборов, снятия кривой разгона технологического объекта и расчета настроек типовых регуляторов инженерными методами.

ТЕМА № 1

1.1. Измерения, измерительные приборы, погрешности измерительных приборов

Измерение – это нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств. Измерить какую-либо физическую величину – значит сравнить ее с другой однородной величиной (мерой), принятой за единицу измерения. Мерой называется средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера (например, гиря – мера массы и т.п.). Число, выражающее отношение измеряемой величины к единице измерения, называется числовым значением измеряемой величины. Если Q – измеряемая величина, U – единица измерения, q – числовое значение измеряемой величины, то $Q = qU$. Это уравнение является основным уравнением измерения, левая часть которого называется результатом измерения [1].

1.2. Измерительные приборы

Измерительными приборами называются устройства, служащие для получения значения измеряемой величины в установленном диапазоне. В измерительной цепи различают три основных узла: первичный измерительный преобразователь (датчик), канал связи и вторичный измерительный прибор (ВИП).

Датчик – это устройство (чувствительный элемент), к которому непосредственно подведена измеряемая величина (параметр). Датчик занимает первое место в измерительной цепи и установлен непосредственно в технологическом объекте, либо на технологическом объекте или как принято говорить – установлен «по месту».

Современной промышленностью выпускаются тысячи видов датчиков, измеряющих десятки параметров: от самых востребованных, таких как температура, расход, уровень (табл. 1), до узкоспециализированных: обрыв ткани,

жирность молока и т.д. Современные датчики, как правило, снабжены нормирующими преобразователями, то есть имеют на выходе унифицированный токовый сигнал ($0 \div 5$ мА, $0 \div 20$ мА, $4 \div 20$ мА), удобный для дальнейшей дистанционной передачи информации.

Вторичный измерительный прибор (ВИП) вырабатывает сигнал о параметре в форме, доступной для наблюдателя. ВИП могут быть показывающими, регистрирующими, интегрирующими и сигнализирующими (рис. 1). В современных системах контроля и управления унифицированный сигнал с выхода датчиков и ВИП может поступать на микропроцессорный контроллер (МПК) и ПЭВМ.

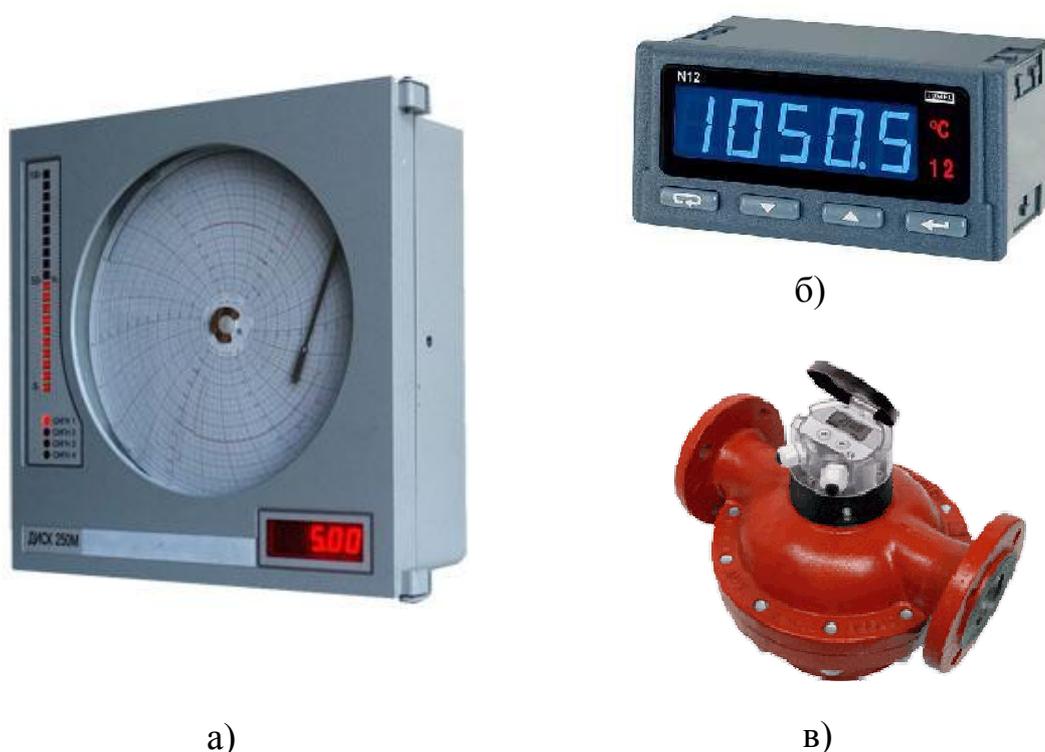


Рис. 1. Вторичные измерительные приборы:

- а) регистрирующий, показывающий и сигнализирующий прибор;
- б) показывающий цифровой прибор;
- в) счетчик - расходомер с электронным счетным устройством и с импульсным выходом

По метрологическому назначению измерительные приборы делятся на рабочие, образцовые и эталонные. *Образцовые приборы* предназначаются для поверки по ним рабочих приборов. *Эталонные приборы* служат для хранения и воспроизведения единиц измерения с наивысшей, достижимой при данном состоянии измерительной техники точностью.

Виды датчиков

№ п/п	Измеряемая величина	Датчик (измерительный прибор)
1	Температура	– Термоэлектрический термометр (термопара) – Термометр сопротивления – Пирометр излучения
2	Уровень	– Уровнемер (поплавковый, буйковый, гидростатический, электрический, ультразвуковой, весовой, радарный и т.д.)
3	Давление	– Манометр – Вакуумметр – Моновакуумметр – Напоромер – Тягомер – Тягонапоромер – Барометр – Дифференциальный манометр
4	Расход	– Сужающее устройство (диафрагма, сопло, сопло Вентури) в комплекте с дифференциальным манометром – Ротаметр – Индукционный расходомер – Вихреакустический расходомер – Кариолисовый расходомер
5	Электрическая величина	– Амперметр – Вольтметр – Ваттметр – Омметр
6	Концентрация, состав	– Концентратомер (кондуктометр) – Газоанализатор – рН- метр
7	Плотность	– Плотномер
8	Размер, положение, перемещение	– Толщиномер – Датчик положения – Датчик обрыва ленты (ткани)
9	Влажность	– Влагомер
10	Скорость (частота)	– Тахометр – Спидометр
11	Вязкость	– Вязкозиметр
12	Масса	– Тензометрический датчик массы

Поверкой называется операция сравнения показаний измерительных приборов с образцовыми приборами для определения их погрешностей или поправок к их показаниям.

Градуировкой называется операция, при помощи которой делениям шкалы прибора придаются значения, выраженные в установленных единицах измерения.

Чувствительностью измерительного прибора называется отношение линейного ΔN или углового $\Delta \varphi$ перемещения указателя к приращению измеряемой величины ΔQ , вызвавшему это перемещение:

$$S = \frac{\Delta N}{\Delta Q}; \quad S_y = \frac{\Delta \varphi}{\Delta Q}. \quad (1)$$

Величина, обратная к чувствительности, называется *ценой деления шкалы прибора*:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta N}; \quad C = \frac{\Delta Q}{\Delta \varphi}. \quad (2)$$

1.3. Погрешности измерительных приборов

Абсолютной погрешностью измерительного прибора называется разность между его показанием и истинным значением измеряемой величины. Так как истинное значение измеряемой величины установить нельзя, в измерительной технике используется так называемое действительное значение, полученное с помощью образцового прибора [2].

Абсолютная погрешность

$$\Delta = X_{\text{п}} - X_{\text{д}}, \quad (3)$$

где $X_{\text{п}}$ – показание прибора; $X_{\text{д}}$ – действительное значение измеряемой величины.

Относительная погрешность

$$\gamma = \frac{\Delta}{X_{\text{д}}} 100\% . \quad (4)$$

Приведенная погрешность

$$\delta = \frac{\Delta}{X_N} 100\%, \quad (5)$$

где X_N – нормирующее значение, в качестве нормирующего значения используются диапазон измерений, верхний предел измерений и др.

Обобщенной характеристикой средств измерения является класс точности, определяемый предельными значениями допускаемых погрешностей, а также другими свойствами средств измерения, влияющими на точность, значение которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений.

Классы точности определяются из ряда предпочтительных чисел: $[1; 1,5; 2; 2,5; 4; 5; 6] 10^n$, где $n = +1, 0, -1, -2$ и т.д. Класс точности указывается на приборе. Если способ задания пределов допускаемой основной погрешности выражается приведенной погрешностью:

$$\delta = \frac{\max \Delta}{N_{\max} - N_{\min}} 100\%, \quad (6)$$

где $\max \Delta$ – наихудшая абсолютная погрешность; N_{\max} – верхний предел диапазона измерения; N_{\min} – нижний предел диапазона измерения, то класс точности обозначается в виде двухзначного числа, например, 1,5.

Если класс точности определяется по относительной погрешности [см. формулу (4)], то он указывается в кружке, например, $\textcircled{1.5}$.

Вариацией измерительного прибора называется максимальная разность между показаниями прибора при прямом и обратном ходе для одного и того же действительного значения измеряемой величины.

Вопросы к теме

1. Разделите приборы, находящиеся в лаборатории на рабочие и образцовые.
2. Классифицируйте вторичные измерительные приборы в лаборатории на показывающие и регистрирующие.
3. Какие погрешности измерений вы знаете? Дайте определение вариации.

4. Определить, какой вид погрешности лег в основу классов точности приборов, находящихся в лаборатории.

ТЕМА № 2

2.1. Измерение давления

Давление является одним из важнейших параметров химико-технологических процессов. Под давлением в общем случае понимают предел отношения нормальной составляющей силы к площади, на которую действует сила. Единицей измерения давления в Международной системе единиц (СИ) является паскаль (Па). Однако до настоящего времени применяются также приборы, отградуированные в $\text{кгс}/\text{см}^2$, мм вод. ст., мм рт. ст. и барах. Между этими единицами и паскалем имеют место следующие соотношения:

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ н}/\text{м}^2; \quad 1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 98066,5 \text{ Па}; \quad 1 \text{ мм вод. ст.} = 9,80665 \text{ Па};$$

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}; \quad 1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па};$$

$$1 \text{ атм} = 101\,325 \text{ Па} = 1,01325 \text{ бар}.$$

Приборы для измерения давления обычно классифицируются по принципу действия и по роду измеряемой величины. По принципу действия промышленные приборы для измерения давления делятся на следующие основные группы:

- 1) **жидкостные**, основанные на уравнивании измеряемого давления гидростатическим давлением столба жидкости;
- 2) **пружинные**, измеряющие давление по величине деформации упругого элемента;
- 3) **электрические**, основанные либо на преобразовании давления в какую-нибудь электрическую величину, либо на изменение электрических свойств материала под действием давления:
 - а) *пьезорезистивные*, основанные на эффекте изменения электрического сопротивления полупроводников под действием давления (нагрузки);

- б) *пьезоэлектрические*, использующие способность некоторых кристаллов (кварца) и керамики генерировать электрическое поле или разность потенциалов пропорционально силе давления (сжатия);
- в) *тензометрические*, использующие тензоэффект при деформации под воздействием давления (нагрузки);
- г) *емкостные*, использующие эффект зависимости емкости конденсатора от расстояния между обкладками.

По роду измеряемой величины приборы для измерения давления и разрежения делятся на: манометры (приборы для измерения абсолютного и избыточного давления); вакууметры (приборы для измерения разрежения (вакуума)); мановакууметры (приборы для измерения избыточного давления и вакуума); напоромеры (приборы для измерения малых избыточных давлений); тягомеры (приборы для измерения малых разрежений); тягонапоромеры (приборы для измерения малых давлений и разрежений); дифференциальные манометры (приборы для измерения разности двух давлений); барометры (приборы для измерения барометрического давления атмосферного воздуха).

2.2. Пружинные приборы

2.2.1. Манометры с трубчатой пружиной

В простейшем и самом распространенном случае упругим элементом служит одновитковая трубчатая пружина (рис. 2,а). Это трубка овального или эллиптического сечения, согнутая по дуге окружности. С ростом измеряемого давления P_2 сечение трубки стремится к круглому, и вследствие этого трубка раскручивается, перемещая свой незакрепленный конец и связанную с ней стрелку манометра. Такие приборы позволяют измерять давление в широком диапазоне. Также применяются манометры с многовитковой трубчатой пружиной, которая обычно имеет $6 \div 9$ витков, намотанных по винтовой спирали. Переход к многовитковой пружине повышает чувствительность манометра. Манометры с многовитковой трубчатой пружиной применяются как самопишущие

и для передачи показаний на расстоянии. Рабочие приборы с круговой шкалой изготавливаются показывающими без дополнительных устройств, а также с электрическими и пневматическим преобразователями для дистанционной передачи.

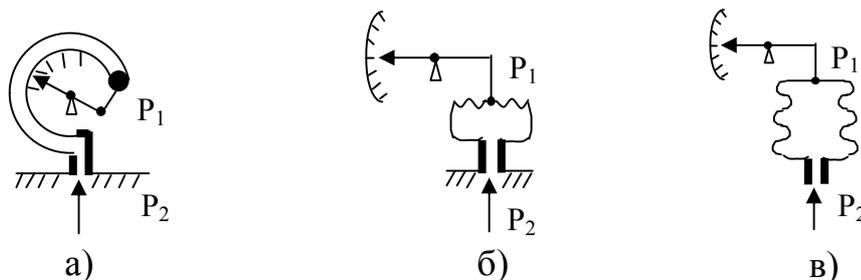


Рис. 2. Виды упругих элементов пружинных манометров:
 (P₁ – атмосферное давление; P₂ – измеряемое давление)

а) одновитковая трубчатая пружина; б) гофрированная мембрана; в) сиффон

2.2.2. Мембранные манометры

В качестве упругого элемента в мембранных приборах служит гофрированная мембрана (рис. 2,б). Гофрировка необходима, чтобы приблизить характеристику мембраны к линейной, хотя одновременно увеличивается жесткость и, следовательно, падает чувствительность мембраны. Для увеличения чувствительности мембраны соединяют попарно в мембранные коробки, а коробки в мембранные блоки.

Мембранные приборы нашли применение в качестве напорометров, тягомеров, тягонапорометров и дифференциальных манометров.

2.2.3. Сиффонные манометры

Чувствительным элементом сиффонного манометра служит гофрированный цилиндрический стакан – сиффон (рис. 2,в). При увеличении давления растет и длина сиффона. С целью снижения нелинейности и гистерезиса, присущих сиффону, его часто усиливают пружиной. Сиффоны обладают высокой чувствительностью, поэтому такие приборы пригодны для измерения небольших давлений.

Широко применяются сиффонные манометры в качестве вторичных приборов.

Лабораторная работа № 1

Поверка пружинных манометров

Цель работы: изучение принципа действия и конструкции пружинных манометров, приобретение навыков поверки пружинных манометров.

С течением времени чувствительные элементы манометров изменяют свои упругие свойства, а передаточные механизмы изнашиваются, поэтому все манометры через определенные промежутки времени следует подвергать поверке, т.е. проверке точности. Поверка приборов заключается в сравнении его показаний с показаниями более точного образцового (контрольного) прибора. Следует различать два вида поверки: контрольная поверка, непосредственно на месте установки манометра; полная государственная поверка в лабораторных условиях.

Чтобы иметь возможность контрольной поверки, следует все рабочие манометры устанавливать на объектах измерения через трехходовые краны. Последние позволяют соединять манометры с атмосферой для поверки нулевой точки прибора. Контрольная поверка производится в сроки, установленные самими предприятиями, эксплуатирующими приборы, в зависимости от важности контролируемого давления и условий работы манометра.

Полная поверка производится в лабораторных условиях на специальных стендах. Стендами для полной поверки манометров могут служить поршневой манометр и винтовой пресс.

Проведение эксперимента

Поверка состоит из следующих основных действий:

1. Изучить устройство поверочного стенда (рис. 3).
2. В соответствии с классом точности поверяемого пружинного манометра наметить точки (согласовать с преподавателем), подлежащие поверки.
3. Произвести в намеченных точках поверку при прямом ходе (при возрастании давления), для этого:

- а) плавным вращением маховика 6 подать избыточное давление на поверяемый (рабочий) и образцовый манометры;
 - б) пользуясь показаниями образцового прибора, установить необходимое давление (действительное значение P_d) и записать его в графу 2 протокола поверки;
 - в) записать в графу 3 протокола соответствующие показания поверяемого прибора P_k ;
4. Произвести поверку в тех же точках, но при обратном ходе (при убывающем давлении).

Поршневой манометр

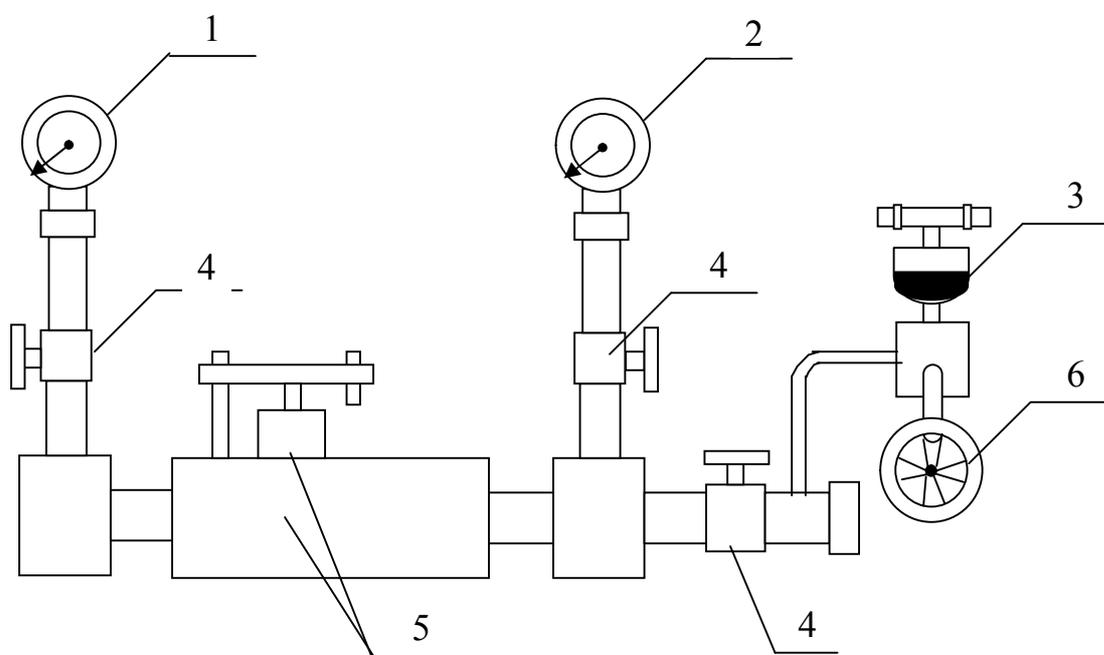


Рис. 3. Схема поршневого манометра
 1 — образцовый манометр; 2 — поверяемый манометр;
 3 — маслобак; 4 — вентили; 5 — система высокого давления
 для подвода сжатого масла к манометрам; 6 — маховик

Обработка экспериментальных данных

1. Найти абсолютные погрешности поверяемого прибора ΔP .
2. Для той из поверяемых отметок, где абсолютная погрешность максимальна, вычислить относительную приведенную погрешность (табл. 2).

3. Сделать и внести в протокол обоснованное заключение о годности поверяемого манометра и о наличии вариации.

ПРОТОКОЛ ПОВЕРКИ

Пружинный манометр типа _____, № _____, класса точности _____ с пределами измерений от _____ до _____ и ценой деления шкалы _____ прошел поверку. Прибор (годен, не годен) к работе.

Таблица 2

Замеры	Поверяемая отметка шкалы P_d , кгс/см ² (МПа)	Показания поверяемого прибора P_k , кгс/см ² (МПа)	Абсолютная погрешность ΔP , кгс/см ² (МПа)	Относительная приведенная погрешность, %
Прямой ход				
1				
2				
Обратный ход				
1				
2				

2.3. Современные электрические приборы измерения давления

Современными фирмами выпускаются различные виды электрических датчиков для измерения давления, но самыми востребованными являются пьезорезистивные и тензометрические датчики.

Основой модели датчика компании Honeywell являются четыре пьезорезистора, имплантированных в канавки, вытравленные на поверхности кремниевой мембраны, и соединенных по мостовой схеме. Внешнее давление вызывает деформацию мембраны, что приводит к разбалансировке моста. Значение создаваемого напряжения рассогласования прямо пропорционально приложенному давлению.

Основой модели датчика компании Freescale является кремниевая подложка, на которую методом ионной имплантации внедряют тензорезистивную

структуру. Сцепление тензорезистивной структуры и кремниевой мембраны на молекулярном уровне позволяет исключить погрешности, связанные с передачей деформации от упругого элемента. Изготавливаемый таким образом монолитный кремниевый измеритель давления, запатентованный фирмой «Моторола», получил название X-ducer из-за крестообразного расположения четырех выводов. Одна пара выводов элемента давления служит для подачи питания, а на второй паре датчик развивает разность потенциалов, которая линейно зависит от приложенного напряжения и механического давления.

Вопросы к теме

1. Классифицируйте приборы для измерения давления по принципу действия и по роду измеряемой величины.
2. Каков принцип действия пружинных приборов для измерения давления?
3. Каково устройство поршневого манометра?
4. Расскажите пути снижения явления гистерезиса и нелинейности, присущие пружинным приборам.
5. Расскажите устройство современных электрических приборов измерения давления.

ТЕМА № 3

3.1. Измерение расхода

Расходомеры делятся на следующие виды:

- 1) *переменного перепада давления*, основанные на зависимости от расхода вещества перепада давления, образующегося в сужающем устройстве в результате частичного перехода потенциальной энергии потока в кинетическую;
- 2) *скоростного напора*, измеряющие расход по динамическому напору потока с помощью пневмометрических трубок;
- 3) *ультразвуковые (акустические) расходомеры*, основанные на измерении какого-либо эффекта, создаваемого при прохождении акустических колебаний сквозь поток жидкости или газа;

- 4) *постоянного перепада давления*, основанные на зависимости от расхода вещества вертикального перемещения тела (поплавка), изменяющего при этом площадь проходного отверстия прибора таким образом, что разность давлений на поплавков остается постоянной;
- 5) *индукционные расходомеры*, основанные на измерении ЭДС, индуктируемой в потоке электропроводной жидкости под действием магнитного поля;
- 6) *вихревые расходомеры*, основанные на определении частоты вихрей, образующихся в потоке измеряемой среды при обтекании тела специальной формы;
- 7) *кориолисовые расходомеры*, основанные на измерении силы Кориолиса;
- 8) *расходомеры*, основанные на других методах измерения.

3.2. Метод переменного перепада давления

Измерение расхода по этому методу основано на измерении потенциальной энергии (статического давления) вещества, протекающего через местное сужение в трубопроводе.

В измерительной технике сужающими устройствами (первичными преобразователями) служат диафрагмы, сопла и сопла Вентури. Из трех этих типов сужающих устройств наиболее часто применяется диафрагма.

Диафрагма (рис. 4) представляет собой тонкий диск, установленный в трубопроводе так, чтобы его отверстие было концентрично внутреннему контуру сечения трубопровода.

Сужение потока начинается до диафрагмы, затем на некотором расстоянии за ней благодаря действию сил инерции поток сужается, 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.

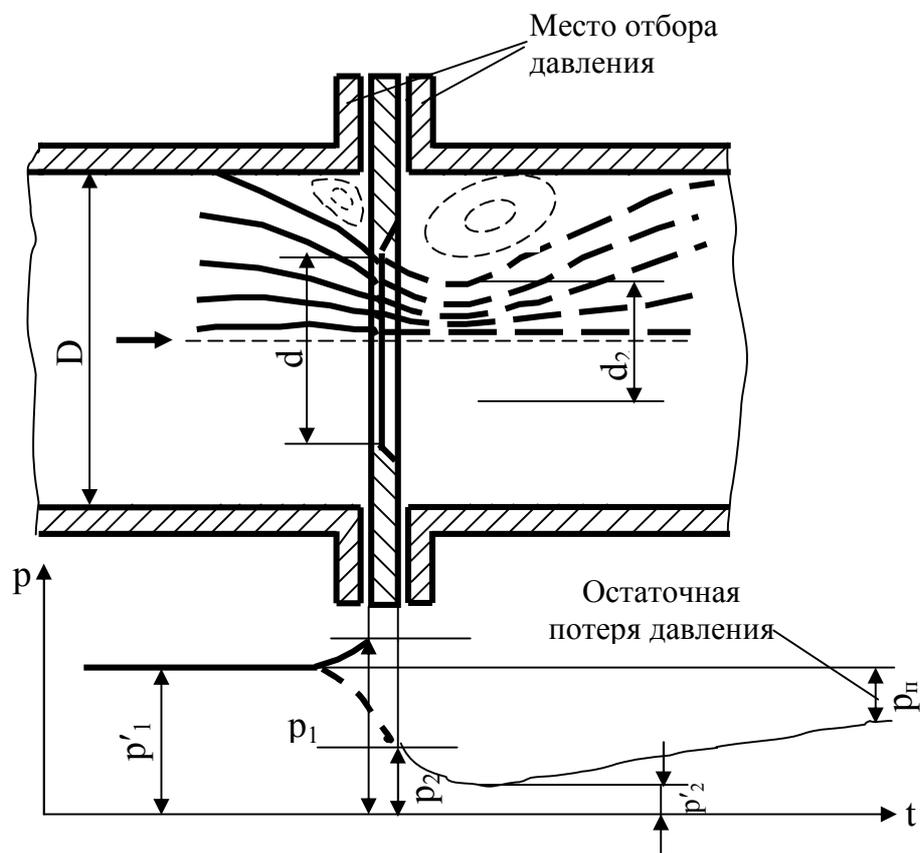


Рис. 4. Характер потока и график распределения статического давления при установке сужающего устройства в трубопроводе

Давление струи около стенки трубопровода несколько возрастает перед диафрагмой и понижается до минимума за диафрагмой в наиболее узком сечении струи. Далее по мере расширения струи давление потока около стенки снова повышается, но не достигает прежнего значения. Потеря части давления $p_{п}$ объясняется главным образом потерей энергии на трение и завихрения.

Разность давлений $p'_1 - p'_2$ является перепадом, зависящим от расхода среды, протекающей через трубопровод.

При измерении расхода по методу переменного перепада давления протекающее вещество должно целиком заполнять все сечение трубопровода и сужающего устройства; поток в трубопроводе должен быть практически установившимся; фазовое состояние веществ не должно изменяться при прохождении через сужающее устройство (жидкость не должна испаряться, пар должен оставаться перегретым и т.п.).

Стандартная диафрагма – наиболее простое и распространенное сужающее устройство. Оно применяется без индивидуальной градуировки для трубопроводов диаметров $D \geq 25$ мм при условии, что $0,05 \leq m \leq 0,7$. Диафрагма представляет собой тонкий диск с круглым концентрическим отверстием (рис. 5), которое имеет со стороны входа острую цилиндрическую кромку.

Толщина диафрагмы E не должна превышать $0,05D_{20}$. Для точной работы необходима строгая концентричность отверстия диафрагмы со стенками трубопровода.

Диафрагму можно изготавливать из любых материалов, при выборе которых следует учитывать свойства измеряемой среды. Разъедание (затупление) острой кромки диафрагмы резко изменяет коэффициент расхода α , измерения становятся неточными. Поэтому для рабочей части диафрагмы необходимо выбирать материал, химически устойчивый к среде и стойкий против механического износа. Наиболее подходящие материалы – сталь марки X17 (для среды с температурой до 400°C) и марки X18H9T X17 (для среды с температурой выше 400°C).

При измерении агрессивных жидкостей и газов следует применять кислотоупорные и жаростойкие стали различных марок, эбонит, винипласт, сплав свинца с сурьмой и др.

Измерение перепада давления в сужающем устройстве обычно производится через отдельные цилиндрические отверстия А или через две кольцевые камеры (камерная диафрагма), каждая из которых соединяется с внутренней полостью трубопровода кольцевой щелью Б (рис. 5). Отверстия должны выполняться таким образом, чтобы края их были гладкими, без заусенцев.

Кольцевые камеры обеспечивают выравнивание давления, что позволяет более точно измерять перепад давления при сокращенных прямых участках трубопровода до и после диафрагмы.

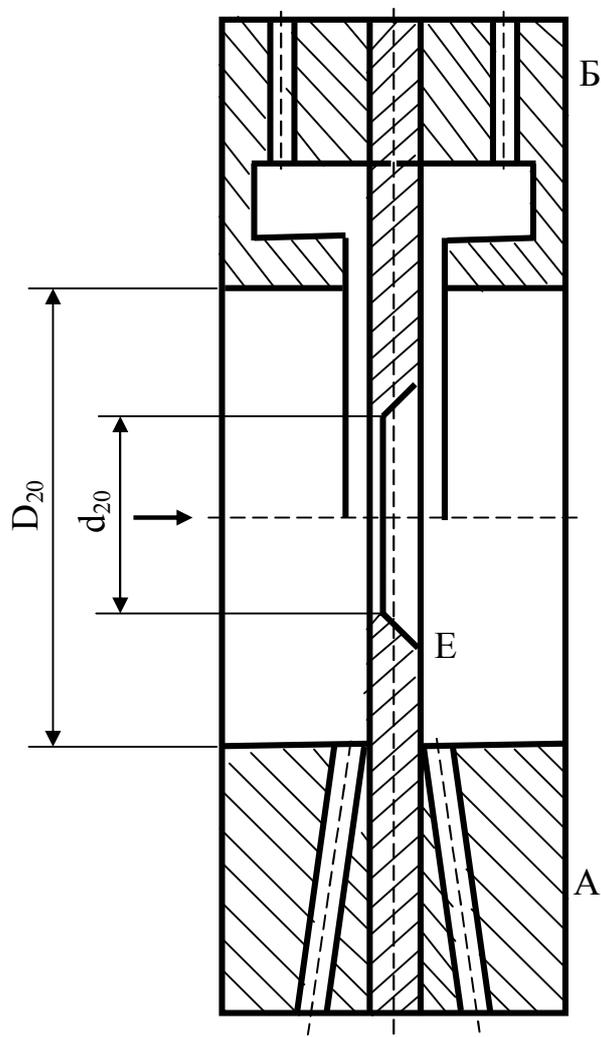


Рис. 5. Диафрагма

А – измерение перепада давления через отдельные отверстия;
 Б – измерение перепада давления через кольцевые камеры

Расход для жидкостей, газов и паров можно рассчитать по формулам:

$$\theta = 4 \cdot 10^3 \alpha \varepsilon m D^2 \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\rho}} \quad \text{м}^3/\text{ч}; \quad (7)$$

$$\theta_m = 4 \cdot 10^3 \alpha \varepsilon m D^2 \sqrt{\rho(p_1 - p_2)} \quad \text{кг/ч},$$

где ρ – плотность, кг/м^3 ; α – коэффициент расхода, учитывающий вид сужающего устройства и физические свойства потока измеряемой среды; ε – коэффициент расширения; $m = d^2/D^2$; d – диаметр отверстия сужающего устройства; D – диаметр трубопровода; p_1, p_2 – давление после сужающего устройства.

3.3. Расходомеры постоянного перепада давления

Наиболее распространенными приборами этой группы являются ротаметры. Шкалы ротаметров практически равномерны, ими можно измерять малые

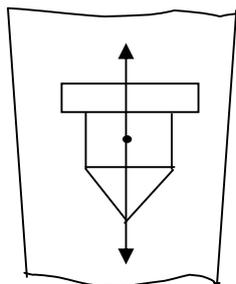


Рис. 6.
Схема
ротаметра

расходы. Схема ротаметра показана на рис. 6. Проходящий через ротаметр снизу поток жидкости или газа поднимает поплавок вверх до тех пор, пока расширяющаяся кольцевая щель между телом поплавка и стенками конусной трубки не достигнет такой величины, при которой действующие на поплавок силы уравниваются. На поплавок ротаметра сверху вниз действуют две силы: сила тяжести и сила от давления потока на верхнюю плоскость поплавка. Снизу вверх

на поплавок действуют также две силы: сила от давления потока на нижнюю плоскость поплавка и сила трения потока о поплавок. При равновесии сил поплавок устанавливается на той или иной высоте, в зависимости от величины расхода. Объемный расход измеряемой среды можно определить по формуле:

$$\theta = \alpha_1 s_k \sqrt{\frac{2gV(\rho_{\text{п}} - \rho)}{\rho s}}, \quad (8)$$

где α_1 – коэффициент расхода; s_k – площадь кольцевого отверстия, образованного конусной трубкой и верхней частью поплавка; V – объем поплавка; $\rho_{\text{п}}$, ρ – плотность материала поплавка и среды; g – ускорение свободного падения; s – площадь наибольшего поперечного сечения поплавка.

Коэффициент расхода α_1 для ротаметров зависит от большого числа величин, которые, как правило, не поддаются аналитическому определению. Поэтому ротаметры градуируют экспериментально. Ротаметры выполняются со стеклянной или металлической трубкой. В верхней части поплавка часто делаются косые прорезы, благодаря чему поплавок вращается вокруг вертикальной оси. При вращении поплавок центрируется внутри трубки, не соприкасаясь со стенками, и его чувствительность повышается. Также применяются ротаметры с электрической дистанционной передачей показаний; для измерения расхода

во взрывоопасных и пожароопасных условиях применяются ротаметры с пневматической дистанционной передачей.

3.4. Расходомеры вихревого принципа действия

Принцип действия прибора (рис. 7) основан на определении частоты вихрей, образующихся в потоке измеряемой среды при обтекании тела специальной формы, установленного в проточной части преобразователя расхода. Частота вихрей пропорциональна объемному расходу и определяется при помощи двух пьезодатчиков, которые фиксируют пульсации давления в зоне вихреобразования.



Рис. 7. Внешний вид показывающего вихревого расходомера

В корпусе проточной части (рис. 8) датчика размещены первичные преобразователи объемного расхода, избыточного давления и температуры. На входе в проточную часть датчика установлено тело обтекания 1. За телом обтекания, по направлению потока газа, симметрично расположены два пьезоэлектрических преобразователя пульсаций давления 2. Преобразователь избыточного давления 3 тензорезисторного принципа действия размещен перед телом обтекания вблизи его крепления. Термопреобразователь сопротивления платиновый 4 размещен внутри тела обтекания. Для обеспечения непосредственного

контакта измеряемой среды и термопреобразователя сопротивления в теле обтекания выполнены отверстия 5. Плата цифровой обработки 6 производит обработку сигналов и передает на вычислитель 7.

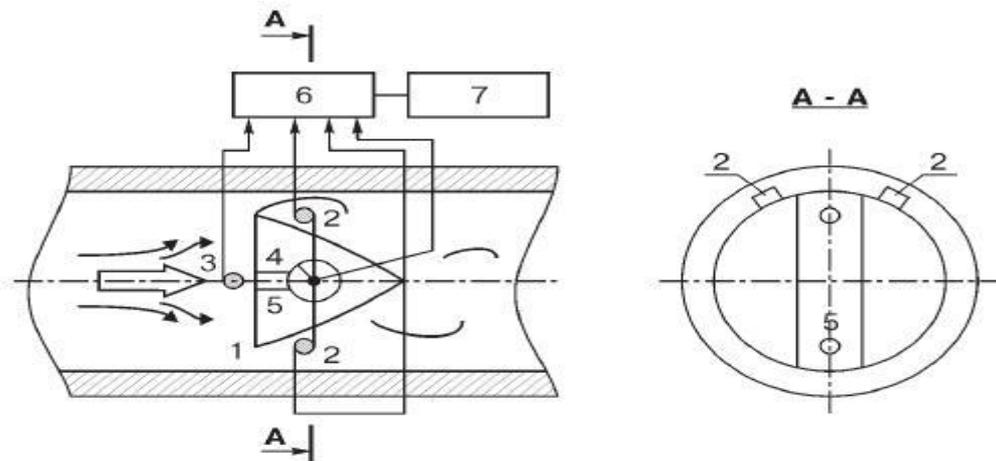


Рис. 8. Структурная схема вихревого расходомера

Преимущества вихревых расходомеров:

- 1) универсальность, приборы могут использоваться для измерения расхода газа, пара и жидкостей (в том числе пищевых продуктов), а также смесей жидкостей, рабочее избыточное давление в трубопроводе до 15,8 МПа, диаметр трубопровода от 15 до 300 мм;
- 2) высокая точность измерения, для жидкостей до 0,5%, для газа и пара до 1%;
- 3) независимость точности измерения от изменения состава среды, температуры, давления и других свойств измеряемой среды;
- 4) дешевизна и надежность, т.к. приборы отличаются простотой конструкции измерительной части и сенсора, который полностью защищен от вредных воздействий измеряемой среды.

3.5. Кориолисовые расходомеры

Французский инженер Г. Кориолис первым заметил, что все тела, движущиеся по поверхности Земли, имеют тенденцию к отклонению в сторону, из-за восточного направления вращения планеты. В Северном полушарии отклонение происходит в правую сторону относительно направления движения; в

Южном – в левую. Это отклонение непосредственно влияет на океанские приливы, а также на погоду на всей планете.

Первые Кориолисовые массовые расходомеры были сконструированы в 1970-х годах. Эти расходомеры искусственно придавали вращающее движение жидкости и измеряли массовый расход, фиксируя результирующий вращающий момент.

Рассмотрим течение жидкости в горизонтальной трубе. Закрепим трубу с одного конца и придадим ей вращение с постоянной угловой скоростью в горизонтальной плоскости относительно точки закрепления. Если жидкости сообщить Кориолисовое ускорение посредством вращения трубы, то величина отклоняющей силы Кориолиса будет зависеть от массового расхода жидкости.

Таким образом, измеряя значение силы Кориолиса жидкости во вращающейся трубе, можно определить величину массового расхода. Естественно, вращать трубу в промышленных условиях крайне неудобно, а в большинстве случаев просто невозможно, но если придать трубе колебательные движения или вибрацию, то можно достичь аналогичного эффекта. Кориолисовые расходомеры могут измерять массовый расход как в прямом, так и в обратном направлении течения жидкости.

В большинстве конструкций труба закреплена в двух точках, и ей сообщается колебательное движение между этими двумя точками. Труба может быть изогнутой или прямой. Также расходомер может состоять из двух параллельных трубок, тогда поток разделяется на два потока на входе и соединяется в один на выходе. В любом случае привод заставляет трубки вибрировать.

Первое поколение Кориолисовых расходомеров представляло собой конструкцию, состоящую из одной U-образной тонкостенной трубки, в которой высокие скорости потока достигались уменьшением поперечного сечения по сравнению с трубопроводом. Отклонение трубки определялось относительно одной точки. При вибрации трубки в точках закрепления создавались изгибающие силы с большой амплитудой. Это подвергало вибрации всю конструкцию. Проблема была решена использованием двухтрубной конструкции

(рис. 9). Такая конструкция снизила внешнюю вибрацию и уменьшила затрачиваемую энергию. Один привод использовался для инициирования вибрации трубок, и два датчика обнаруживали кориолисовое отклонение.

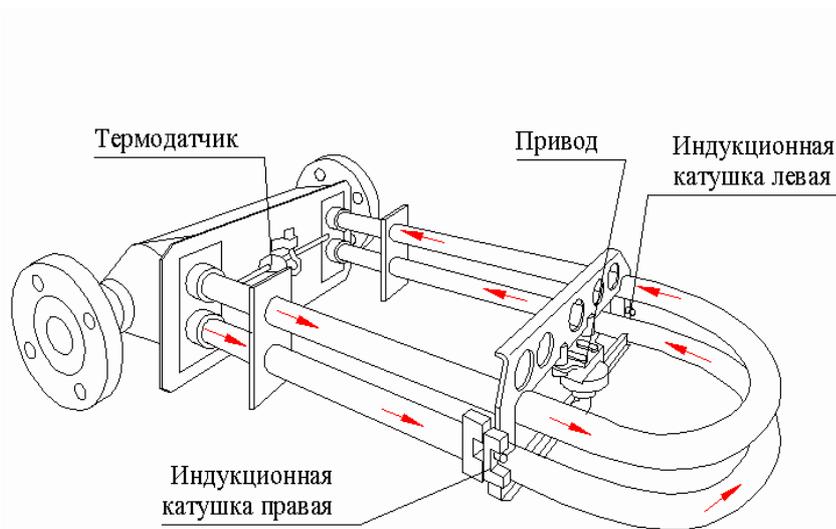


Рис. 9. Двухтрубная конструкция кориолисового расходомера

Последующие усовершенствования конструкции заключались в изменении формы трубок, включая те, которые не разделяют поток, и те, что имеют несколько приводов.

Современные расходомеры работают с низкими скоростями потока (менее 3 м/с) и низким падением давления, могут быть установлены в любом положении и имеют большой срок службы при работе с вязкими и агрессивными средами. Трубки нагружают с учетом их предела выносливости и обычно изготавливают из нержавеющей стали, Hastelloy (высокопрочный, коррозионно-стойкий сплав на основе никеля) и титана.

Стоимость Кориолисовых расходомеров достаточно высока. Применение таких расходомеров рационально там, где требуется высокая точность (узел коммерческого учета), а также там, где необходимо измерять несколько параметров (включая плотность, температуру). И в тоже время применение их нерационально, при измерениях в простых системах, где высокая точность не так важна.

3.6. Ультразвуковые (акустические) расходомеры

Принцип действия ультразвуковых расходомеров заключается в измерении какого-либо эффекта, создаваемого при прохождении акустических колебаний сквозь поток жидкости или газа. Большинство акустических расходомеров работает в ультразвуковом диапазоне. Существуют два основных типа устройств.

Времяпроходные расходомеры (или фазового сдвига) основаны на разности времен прохождения ультразвукового импульса в направлениях «по» и «против» потока. То есть, при распространении звуковой волны в движущейся среде время ее прохождения от источника до приемника определяется не только скоростью распространения звука в данной среде, но и скоростью движения самой среды. Если звуковая волна направлена по движению потока, скорости их складываются, если против потока, - вычитаются. Разность времени прохождения звука по направлению потока и против него пропорциональна скорости потока и, следовательно, расходу жидкости.

Доплеровские расходомеры основаны на эффекте Доплера – изменении частоты отраженного от движущейся среды сигнала. Ультразвуковые волны, генерируемые излучателями, отражаются от взвешенных частиц жидкости, завихрений, пузырьков газа и т.п. и воспринимаются приемниками отраженных излучений. Разность между частотами излучаемых и отраженных акустических волн позволяет определить скорость потока.

Преимущества ультразвуковых (акустических) расходомеров: измерение расходов загрязненных, агрессивных и быстrokристаллизующихся жидкостей и пульп, а также потоков, в которых возможны пульсации расходов, гидроудары; бесконтактность измерения (установка накладных датчиков) и, как следствие, отсутствие движущихся частей в потоке; установка на трубах большого диаметра, поскольку стоимость одной точки установки не зависит от размера трубопровода. Доплеровские расходомеры нельзя использовать для очень чистых сред (совсем без включений).

Лабораторная работа № 2

Измерение расхода индукционным расходомером

Цель работы: ознакомиться с принципом действия индукционного расходомера и провести градуировку вторичного прибора.

Выполнение работы

Индукционные расходомеры являются идеальными приборами для измерения расхода электропроводных жидкостей. Принцип измерения индукционного расходомера основан на законе Фарадея об индукции напряжения в движущемся проводнике. Проводником является измеряемая жидкость, которая движется в магнитном поле. При движении жидкости возникает электрическое напряжение, которое снимается с помощью пары электродов. Величина этого напряжения прямо пропорциональна средней скорости движения измеряемой жидкости.

Индукционные расходомеры очень точны, измерение не зависит от плотности, температуры и давления измеряемой величины.

На рис. 10 представлена схема для измерения расхода.

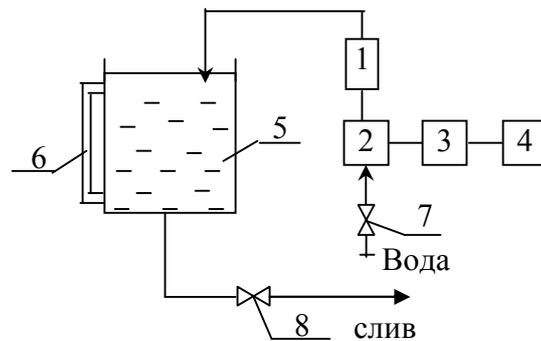


Рис. 10. Схема для измерения расхода

В цилиндрический бак 5 подается через вентиль 7 вода. Расход воды измеряется датчиком индукционного расходомера ДРИ-25 (поз. 2). Сигнал с ДРИ-25 поступает на электронный блок ИР-51 (поз. 3). Унифицированный токовый сигнал $0 \div 5$ мА, пропорциональный величине расхода, регистрируется потенциометром КСП-3 (поз. 4). Значение расхода воды также можно фиксиро-

вать по ротаметру РМ-25 (поз. 1). Вода заполняет бак, и действительное значение расхода воды можно определить по изменению уровня. Изменение уровня воды фиксируется по измерительному стеклу 6.

1. Для того чтобы произвести градуировку вторичного прибора КСП-3, необходимо открыть вентиль 7 и начать заполнять установку водой. Регулировкой вентиля 7 установить значение расхода по прибору 4 на первую оцифрованную отметку. За фиксированный промежуток времени, например 1 минуту, определить подъем уровня воды в миллиметрах, пользуясь водомерным стеклом 6. Затем рассчитать значение расхода 1 мм бака – 0,125 л и занести данные в табл. 3.

Таблица 3

Шкала вторичного прибора КСП -3, %	Время, мин	Подъем уровня воды, мм	Расход, л/мин

2. Произвести замер расхода по всем оцифрованным отметкам прибора 4 в прямом и обратном направлении.

3. Результаты измерений свести в таблицу, построить градуировочный график в координатах: отметки шкалы прибора (%) – расход (л/мин).

4. Построить на графике прямую с расчетом, чтобы сумма положительных и отрицательных отклонений экспериментальных точек от прямой приближалась к нулю.

5. На графике отметить максимальное отклонение экспериментальной (наихудшей) точки от прямой – $\max \Delta$.

6. Максимальное отклонение (абсолютная погрешность измерений) пересчитанное на относительную приведенную погрешность в процентах определит класс точности прибора КСП-3. Полученное значение округлить до стандартного 1; 1,5; 2 и т.д.

Лабораторная работа № 3

Измерение расхода ротаметром РМ-25

Цель работы: ознакомиться с принципом действия ротаметра РМ-25 и провести его градуировку.

Выполнение работы

На рис. 10 представлена схема для измерения расхода.

1. Для того чтобы произвести градуировку ротаметра, необходимо открыть вентиль 7 и начать заполнять установку водой. Регулировкой вентилей 7 установить значение расхода по ротаметру на первую оцифрованную отметку. За фиксированный промежуток времени, например 1 минуту, определить подъем уровня воды в миллиметрах, пользуясь водомерным стеклом 6. Затем рассчитать значение расхода 1 мм бака – 0,125 л и занести данные в табл. 4.

Таблица 4

Шкала ротаметра, %	Время, мин	Подъем уровня воды, мм	Расход, л/мин

2. Произвести замер расхода по всем оцифрованным отметкам ротаметра в прямом и обратном направлении.

3. Результаты измерений свести в таблицу, построить градуировочный график в координатах: отметки шкалы прибора (%) – расход (л/мин).

4. Построить на графике прямую с расчетом, чтобы сумма положительных и отрицательных отклонений экспериментальных точек от прямой приближалась к нулю.

5. Максимальное отклонение (абсолютная погрешность измерений), пересчитанное на относительную приведенную погрешность в процентах, определит класс точности РМ - 25. Полученное значение округлить до стандартного 1; 1,5; 2 и т.д., превышающего исходное.

Вопросы к теме

1. Классифицируйте расходомеры по принципу действия.
2. В чем суть метода переменного перепада давления?
3. Расскажите устройство стандартной диафрагмы.
4. Расскажите о расходомерах постоянного перепада давления.
5. Расходомеры вихревого принципа действия, их достоинства.
6. Кориолисовые и ультразвуковые расходомеры.

ТЕМА № 4

4.1. Измерение температуры

Температура – важнейший параметр химико-технологических процессов. В химической промышленности широк диапазон контролируемых температур, поэтому применяются разнообразные методы измерения. Измерение температуры практически возможно лишь методом сравнения нагретости двух тел. Для сравнения степени нагретости используют изменение какого-либо физического свойства, зависящего от температуры и легко поддающегося измерению. По принципу действия термометры делятся на группы: термометры расширения; манометрические термометры; термометры сопротивления; термоэлектрические термометры; пирометры излучения. Наибольшее распространение получили термометры сопротивления, термоэлектрические термометры и пирометры излучения. Ознакомимся с их принципом действия подробнее.

4.2. Термоэлектрические термометры

В основу работы термопар положено явление термоэлектрического эффекта. Иначе его называют явление Зеебека – возникновение электродвижущей силы в замкнутой электрической цепи, составленной из последовательно соединенных разнородных проводников, если места их контакта (спаи) поддер-

живают при различных температурах. Явление Зеебека (возникновение термоЭДС – термоэлектродвижущей силы) обусловлено следующими причинами:

- а) преимущественной диффузией носителей тока в проводнике от нагретого конца к холодному (объемная составляющая термоЭДС);
- б) зависимостью контактной разности потенциалов от температуры, связанной с зависимостью химического потенциала от температуры (контактная составляющая термоЭДС);
- в) увлечение электронов фононами, которые преимущественно перемещаются от горячего конца проводника к холодному и, взаимодействуя с электронами, вызывают преимущественное перемещение их в том же направлении (фононная составляющая термоЭДС).

Простейшую замкнутую электрическую цепь, состоящую из двух разнородных проводников, называют термоэлементом или термопарой.

В простейшей термоэлектрической цепи, составленной из двух разнородных проводников А и В, возникают четыре различных термоЭДС: две в местах спаев проводников, одна на конце проводника А и одна на конце проводника В (рис. 11). Если принять, что спаи проводников нагреты до температур t и t_0 , то, обходя цепь против часовой стрелки, получим

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0), \quad (9)$$

$e_{AB}(t)$ и $e_{AB}(t_0)$ – термоЭДС, обусловленные контактной разностью потенциалов и разностью температур концов проводников А и В, пусть $t = t_0$, тогда

$$\begin{aligned} E_{AB}(t_0) &= e_{AB}(t_0) + e_{BA}(t_0) = 0; \\ -e_{AB}(t_0) &= +e_{BA}(t_0). \end{aligned} \quad (10)$$

Если (10) подставить в (9), то получим уравнение термопары:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0), \quad (11)$$

полагая $t_0 = \text{const}$, получим функциональную зависимость:

$$E_{AB}(t, t_0) = f(t),$$

таким образом, можно свести измерение температуры к определению термоЭДС термопары.

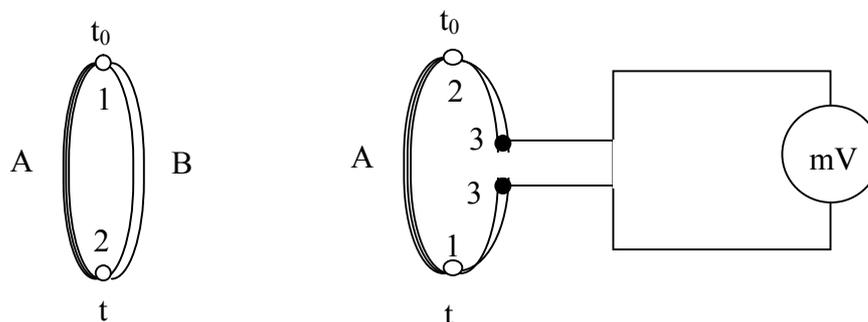


Рис. 11. Термопары

Однако не всякая термопара будет пригодна для практического применения, так как требования, предъявляемые к материалам термопар, следующие:

- 1) они не должны изменять с течением времени (в пределах рабочих температур) своих механических и химических свойств;
- 2) должны обладать достаточно высокой термоЭДС;
- 3) должны иметь хорошую электропроводность;
- 4) должны иметь линейную зависимость термоЭДС от температуры.

Такие материалы получили название термоэлектродных материалов. К их числу относятся чистые металлы (платина, медь, вольфрам) и сплавы (платинородий, хромель, копель).

Термопары позволяют измерять температуру от -200 до $+2500^{\circ}$ и изготавливаются следующих типов: ТВР(А) – вольфрамрениевые; ТПР(В) – платинородий – платинородиевые; ТПП(С) – платинородий–платиновые; ТХА(К) – хромель–алюмелевые; ТХК(Л) – хромель–копелевые и т.д.

Практически для всех металлов и сплавов функциональная зависимость термоЭДС от температуры сложна, и выразить ее аналитически весьма трудно, поэтому измеряемую температуру определяют по градуировочной таблице для данного значения термоЭДС.

Таким образом, для определения температуры с помощью термопары необходимо измерить развиваемую термоЭДС. Для включения измерительного прибора необходимо разорвать электрическую цепь (рис. 11). Существует правило: термоЭДС термопары не изменяется от введения в ее цепь третьего про-

водника, если концы этого проводника имеют одинаковые температуры. Термопары градуируются при постоянной температуре холодного спая. Чаще всего $t_0 = 0^\circ\text{C}$. Однако, иногда происходит изменение t_0 , тогда необходимо вносить поправки. Но даже введение поправки не приведет к нужному результату, если не будет обеспечено постоянство температуры холодных спаев. Оно достигается с помощью соединительных проводов и специальных термостатирующих устройств. Соединительные провода предназначены для удаления холодных спаев из зоны с меняющейся температурой. Для того чтобы в местах контактов термоэлектродов и соединительных проводов не возникали паразитные ЭДС, эти провода должны быть подобны термоэлектродам термопары. Такие провода называют термоэлектродными и выполняют из тех же материалов, из которых изготовлены термоэлектроды термопар.

Современной промышленностью выпускаются различные виды термопар: высокотемпературные (свыше 1000°C), кабельные (измеряют температуру в местах со сложной топологией, в том числе в зазорах $0,3 \div 1$ мм), многозонные, игольчатые (для измерения температуры при горячей и холодной переработке пищевых продуктов) и т.д. (рис. 12).

На рис. 13 изображена высокотемпературная термопара ТП 0395/10 компании «Элемер», предназначенная для измерения температуры погружным методом в расплавах алюминия и цветных металлов. Чехол термопары изготовлен из чугуна, который покрыт защитной пленкой из окиси циркония.



Рис. 12. Виды термопар

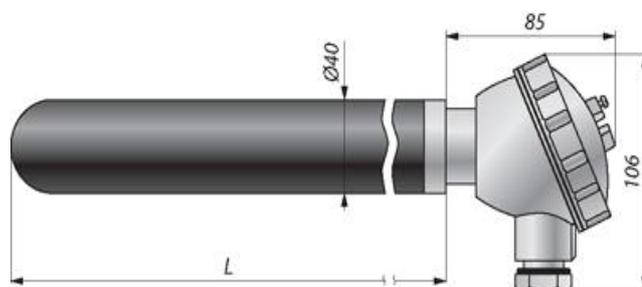


Рис. 13. Термопара ТП 0395/10

Измерение температуры твердых тел и поверхности. Для контроля температуры поверхностей можно применять стационарные термопары: электроды термопары (так называемые ленточные термоэлектроды) прижимаются к контролируемой поверхности (т.е. свариваются встык). Термоэлектроды в виде лент изготавливаются из меди, хромеля, копеля и т.д. Когда необходимо измерить температуру вращающейся поверхности (валковые машины, сушильные барабаны, каландры) применяют термопары с так называемым промежуточным телом, которое контактирует с вращающейся поверхностью.

Лабораторная работа № 4

Проверка градуировки электронного потенциометра

Цель работы: ознакомиться с устройством и работой электронного потенциометра и провести поверку потенциометра КВП 1.

Для измерения ЭДС компенсационным методом применяют приборы, называемые потенциометрами.

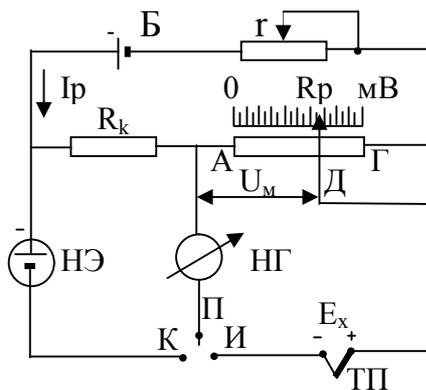


Рис. 14. Схема измерения ЭДС термопары компенсационным методом

Принципиальная схема измерения ЭДС термопары ТП компенсационным методом показана на рис. 14. Источник ЭДС включен на сопротивление реохорда R_p. Встречно через гальванометр НГ, называемый нуль-гальванометром, к реохорду подключена термопара. При положении ползуна Д, когда напряжение между точками А и Д реохорда точно равно термоЭДС тер-

мопары, ток в цепи нуль-гальванометра будет равен нулю. По положению ползуна Д в этот момент (когда прибор НГ показывает нуль) можно определить величину измеряемой ЭДС. Таким образом, если с осью ползуна Д жестко связать стрелку, то она в момент полной компенсации будет показывать либо термоЭДС термопары в милливольтгах, либо прямо измеряемую температуру в градусах. Чтобы постепенное снижение напряжения сухого элемента Б не вносило погрешность в измерения, предусмотрена контрольная цепь, позволяющая периодически устанавливать ток в измерительной цепи. Сравнивая напряжение на контрольном сопротивлении R_k с напряжением нормального элемента (НЭ) подстраивают измерительную цепь так, чтобы обеспечить постоянство тока в компенсирующем реохорде.

При измерении термоЭДС термопары ТП переключатель находится в положении "И" (измерение). Для контроля тока в цепи реохорда переключатель переводят в положение "К" (контроль).

При этом термопара ТП отключается от схемы, а НЭ подключается так, что его напряжение сравнивается с напряжением на контрольном сопротивлении R_k , величина контрольного сопротивления выбирается так, чтобы при протекании по нему номинального для данного прибора тока падение напряжения на сопротивлении R_k было точно равно напряжению нормального элемента (1,0183 В):

$$E_{НЭ} = R_k I_p . \quad (12)$$

Таким образом, при переводе переключателя в положение "К" нуль-гальванометр должен показать нуль. Если этого не произошло, то регулировочным сопротивлением r добиваются такой силы тока I_p , чтобы наступил момент компенсации (стрелка нуль-гальванометра установилась на нуль). Переводом переключателя "П" и перемещением движка реохорда Д добиваются равенства:

$$E(t, t_0) = I_p R_{p(AД)} . \quad (13)$$

Подставив значение I_p в уравнение (13), получим:

$$E(t, t_0) = \frac{E_{НЭ}}{R_k} R_{p(AД)} , \quad (14)$$

т.к. $E_{НЭ}$ и R_K постоянны, то $E(t, t_0)$ будет зависеть от величины R_p (АД).

Точность измерения компенсационным методом зависит от чувствительности нуль-гальванометра. Поэтому в современных автоматических электронных потенциометрах в качестве нуль-прибора используют электронный усилитель с большим коэффициентом усиления. Электронные потенциометры являются приборами повышенной точности, обычно класса 0,5 и 0,25.

Выполнение работы

1. Подключают поверяемый прибор КВП 1 к сети переменного тока.
2. Проверяют "механический нуль", т.е. положение указателя относительно начала шкалы прибора.
3. Подготавливают к работе лабораторный потенциометр.
4. К зажимам приборов ПП-63 и КВП 1 подключают источник регулируемого напряжения ИРН и переключатель ВК переводят в положение "1".
5. Учитывая наличие в автоматических потенциометрах, работающих в комплекте с термопарами, поправки на температуру свободных концов термопары, необходимо применять схему поверки с использованием компенсационных проводов. В этом случае показания образцового потенциометра в милливольтках эквивалентны термоЭДС термопары, подаваемой на зажимы поверяемого прибора. Этот метод поверки соответствует схеме включения прибора в эксплуатационных условиях и позволяет проверять правильность автоматического введения поправки с помощью катушки, встроенной в прибор.
6. Поверку градуировки производят на всех оцифрованных отметках шкалы поверяемого потенциометра.
7. Для упрощения подсчетов допускаемые величины основной погрешности Δ и вариации V , обычно выраженные в процентах от диапазона шкалы, выражают в милливольтках и сравнивают с ними погрешности поверяемого прибора:

$$\Delta = V = E_k \cdot K / 100,$$

где E_k – верхний предел шкалы, мВ, К – класс точности поверяемого потенциометра.

С величинами допустимых погрешностей сравнивают полученные при поверке значения:

а) основной погрешности Δ :

$$\Delta_1 = E_{гр} - E_1; \Delta_2 = E_{гр} - E_2,$$

б) вариации:

$$V = E_1 - E_2,$$

где $E_{гр}$ – термоЭДС из градуировочной таблицы, соответствующая поверяемой отметке градусной шкалы за вычетом термоЭДС, соответствующей температуре холодных спаев термопары; E_1 и E_2 – показания переносного потенциометра, соответствующие той же поверяемой отметке при прямом и обратном ходе стрелки.

ПРОТОКОЛ ПОВЕРКИ

Электронный потенциометр типа _____, № _____,

класса точности _____ градуировка _____

предел измерений от _____ до _____

Образцовый прибор: переносной потенциометр

№ _____ тип _____

Прибор (годен, не годен) к работе.

Таблица 5

Показания поверяемого прибора	Номинальные значения показаний с учетом температуры холодных спаев $E_{гр}$	Показания образцового потенциометра		Абсолютные погрешности поверяемого прибора		
		прямой ход E_1	обратный ход E_2	основная		вариация
				прямой ход Δ_1	обратный ход Δ_2	
°С		мВ				

4.3. Термометры сопротивления

Электрические термометры сопротивления – это датчики температуры. Измерение температуры термометрами сопротивления основано на свойстве проводников и полупроводников изменять свое электрическое сопротивление с изменением температуры. Омическое сопротивление проводников и полупроводников является некоторой функцией от температуры $R = f(t)$.

Измеряя сопротивление проводника и зная вид функции данного материала, можно определить его температуру, следовательно, и температуру среды, в которую он помещен. К материалам, из которых изготавливаются термометры сопротивления, предъявляются следующие требования:

- 1) иметь по возможности большой и стабильный температурный коэффициент электрического сопротивления при линейной зависимости сопротивления от температуры;
- 2) иметь высокое удельное электрическое сопротивление для обеспечения возможности изготовления малогабаритных термометров сопротивления;
- 3) быть физически и химически устойчивым в условиях эксплуатации;
- 4) обладать свойством воспроизводимости, особенно по температурному коэффициенту электрического сопротивления и удельному электрическому сопротивлению.

Наибольшее применение в промышленности нашли металлические термометры сопротивления (ТСМ – термометр сопротивления медный, ТСП – термометр сопротивления платиновый). Полупроводниковые термометры не нашли широкого распространения по причине плохой воспроизводимости свойств.

Медный термометр сопротивления выполняется из пластмассовой трубочки диаметром $7 \div 8$ мм, длиной 70 мм, на которую наматывается необходимое количество изолированной лаком медной проволоки диаметром 0,1 мм. Свободные концы проволоки припаиваются к толстым медным токоотводам, которые крепятся к клеммам пластмассовой панельки. Для защиты от механи-

ческих повреждений и от коррозии такой элемент помещается в чехол. В платиновых термометрах, предназначенных для измерения более высоких температур (до 650°C), для изготовления каркасов и изоляции элемента применяются пластинки слюды. Наличие чехла и изоляции сообщает термометрам сопротивления значительную тепловую инерцию.

Современной промышленностью выпускаются различные виды термометров сопротивления (рис. 15): малогабаритные (для измерения температуры подшипников, поверхности твердых тел), игольчатые (для измерения температуры пищевых продуктов), во взрывонепроницаемой оболочке (для работы во взрывоопасных производствах), с защитным чехлом во фторопластовой оболочке (для измерения температуры концентрированных растворов кислот, щелочей) и т.д.

На рис. 16 изображен платиновый термометр сопротивления ТС 1288 компании «Элемер» во взрывонепроницаемой оболочке для измерения температур ($-50 \div 350^{\circ}\text{C}$) жидких, газообразных и сыпучих сред (длина погружной части $L = 60 \div 630$ мм, $D = 3 \div 6$ мм).



Рис. 15. Виды термометров сопротивления

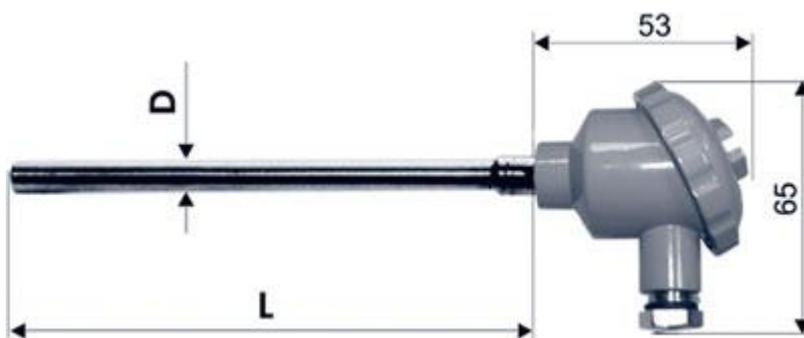


Рис. 16. Платиновый термометр сопротивления ТС 1288

В качестве вторичных приборов, работающих с термометрами сопротивления, используют: логометры, уравновешенные и неуравновешенные мосты. Логометры являются электроизмерительными приборами магнитоэлектрической системы, предназначенными для измерения соотношения двух токов.

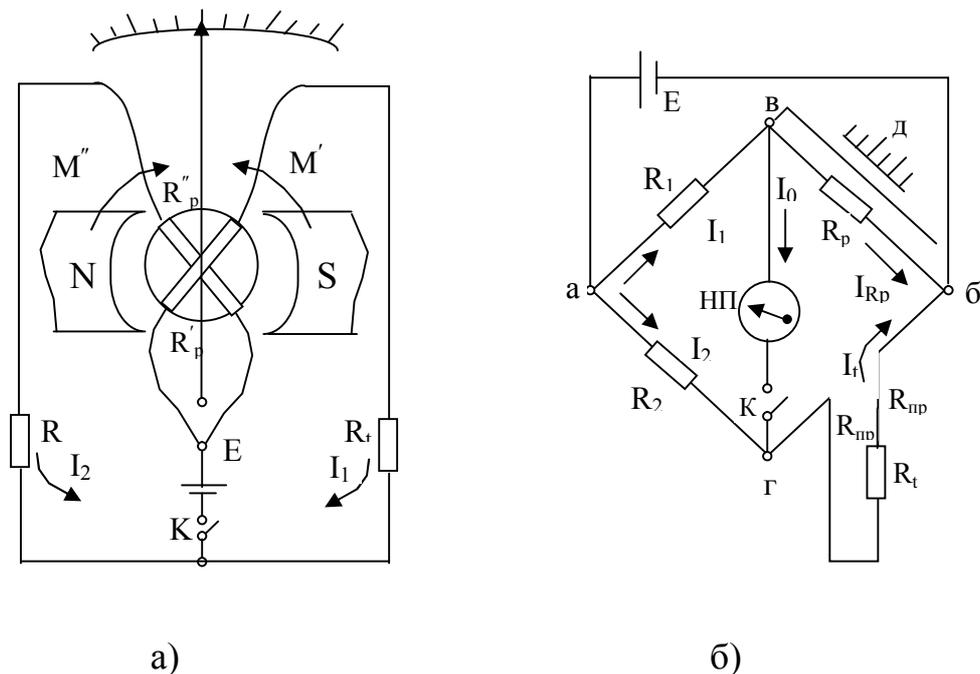


Рис. 17. Принципиальная схема:
а) логометра; б) уравновешенного моста

На рис. 17, а приведена упрощенная схема логометра. Подвижная система логометра состоит из двух скрещенных под острым углом и жестко связанных между собой рамок. К рамкам прикреплена стрелка, перемещающаяся вдоль шкалы, отградуированной в градусах. Рамки с одной стороны подключены к общему источнику питания E , с другой стороны в цепь одной из рамок включается термометр сопротивления R_t , а в цепь другой постоянное сопротивление R . Рамки логометра по всем параметрам тождественны, за исключением направления витков рамок, которое является противоположным. Благодаря этому вращающие моменты рамок направлены навстречу друг другу: $M' = kI_1V_1$; $M'' = kI_2V_2$, где I_1, I_2 – токи в цепях рамок, V_1, V_2 – магнитные индукции в зоне расположения рамок 1 и 2, k – коэффициент пропорциональности, зависящий от характеристик рамок. В момент равновесия вращающие мо-

менты рамок равны, и отношение токов является функцией температуры среды. Отношения магнитных индукций изменяются с изменением положения рамок в магнитном поле, следовательно, являются функцией угла поворота рамок; таким образом, угол поворота подвижной системы логометра находится в зависимости от температуры.

Также в качестве вторичных приборов, работающих с термометрами сопротивления, часто применяются уравновешенные мосты.

Уравновешенные мосты – это приборы, работающие с различными датчиками, в которых технологический параметр (температура, давление и т. п.) может быть преобразован в изменение сопротивления. Наиболее широко уравновешенные мосты применяются в качестве вторичных приборов при работе с термометрами сопротивления.

Принципиальная схема уравновешенного моста изображена на рис. 17, б. Мост состоит из двух постоянных сопротивлений R_1 и R_2 , сопротивления реохорда R_p , сопротивления термометра R_t с сопротивлением соединительных проводов $R_{пр}$. В одну диагональ моста включается источник питания E , а в другую – нуль-прибор НП. При равновесии моста, которое достигается перемещением движка «Д» по реохорду, ток в измерительной диагонали моста равен нулю $I_0 = 0$.

Для этого случая справедливы равенства:

$$R_1 I_1 = R_2 I_2; \quad (15)$$

$$R_p I_{Rp} = (R_t + 2R_{пр}) I_t. \quad (16)$$

Разделив равенство (15) на равенство (16), получим

$$\frac{R_1 I_1}{R_p I_{Rp}} = \frac{R_2 I_2}{(R_t + 2R_{пр}) I_t}, \quad (17)$$

при $I_0 = 0$, $I_1 = I_{Rp}$, $I_2 = I_t$ уравнение примет вид:

$$\frac{R_1}{R_p} = \frac{R_2}{R_t + 2R_{пр}}.$$

Неизвестное сопротивление равно

$$R_t = \frac{R_2}{R_1} R_P - 2R_{пр}. \quad (18)$$

Таким образом, неизвестное сопротивление термометра, а следовательно, и температура определяется при прочих постоянных сопротивлениях величинной сопротивления участка реохорда R_P . Величина сопротивления участка реохорда однозначно определяется положением движка по отношению к реохорду. Если с движком связать указатель и предварительно отградуировать шкалу, то по положению указателя можно сразу производить отсчет температуры.

В промышленных условиях в качестве уравновешенных мостов нашли широкое применение электронные мосты.

Лабораторная работа № 5

Поверка логометра Л - 64

Цель работы: изучить принцип действия логометра, ознакомиться со стендом для поверки; поверить логометр.

Выполнение работы

1. Подать напряжение питания на источник сетевого питания. По вольтметру установить напряжение питания 4 В.
2. Переключатель ПК-1 перевести в левое положение, подключив логометр Л-64 к источнику питания.
3. Поверку градуировки прибора произвести во всех оцифрованных отметках шкалы при ходе стрелки поверяемого прибора слева направо, а затем при обратном ходе. Для каждой поверяемой точки вычисляем абсолютную погрешность $R_{гр} - R$; $R_{гр}$ – градуировочное сопротивление, соответствующее температуре поверяемой точки (по данным градуировочной таблицы); R – сопротивление "магазина сопротивлений", соответствующее поверяемой отметке шкалы. Полученные данные сводим в таблицу протокола поверки, где R_k и R_n градуировочные сопротивления, соответствующие конечной и начальной отметкам шкалы.

4. Определить действительный класс точности прибора и вариацию.

ПРОТОКОЛ ПОВЕРКИ

Логометр типа _____, № _____,
класса точности _____ градуировка _____ с пределами измерений от R_n _____
до R_k _____ и ценой деления шкалы _____ прошел поверку.
Прибор (годен, не годен) к работе.

Таблица 6

Температура, °С	$R_{гр}$, Ом	R (по магазину сопротивле- ний), Ом	$\Delta = R_{гр} - R$, Ом	$\frac{\Delta_{\max}}{R_k - R_n} 100\%$
Прямой ход				
1				
Обратный ход				
1				

Лабораторная работа № 6

Поверка электронного моста КСМЗ-П

Цель работы: изучить принцип действия электронного моста, ознакомиться со стендом для поверки; поверить КСМЗ-П.

Выполнение работы

1. Подать напряжение питания на источник сетевого питания. По вольтметру установить напряжение питания 4 В.
2. Переключатель ПК-1 перевести в правое положение, подключив электронный мост к источнику питания.
3. Поверку градуировки прибора произвести во всех оцифрованных отметках шкалы при ходе стрелки поверяемого прибора слева направо, а затем при обратном ходе. Для каждой поверяемой точки вычисляем абсолютную погрешность $R_{гр} - R$; $R_{гр}$ – градуировочное сопротивление, соответствующее температуре поверяемой точки (по данным градуировочной таблице); R – сопро-

тивление "магазина сопротивлений", соответствующее поверяемой отметке шкалы. Полученные данные сводим в таблицу протокола поверки, где R_k и R_n градуировочные сопротивления, соответствующие конечной и начальной отметкам шкалы.

4. Определить действительный класс точности прибора и вариацию.

ПРОТОКОЛ ПОВЕРКИ

Электронный мост КСМЗ-П № _____,
 класса точности _____ градуировка _____ с пределами измерений от R_n _____
 до R_k _____ и ценой деления шкалы _____ прошел поверку.
 Прибор (годен, не годен) к работе.

Таблица 7

Температура, °С	$R_{гр}$, Ом	R (по магази- ну сопротив- лений), Ом	$\Delta = R_{гр} - R$, Ом	$\frac{\Delta_{\max}}{R_k - R_n} 100\%$
Прямой ход				
1				
Обратный ход				
1				

4.4. Пирометры излучения

Пирометры излучения – приборы для бесконтактного измерения температуры тел, основаны на измерении мощности теплового излучения объекта измерения.

Имеют следующие преимущества:

а) измерение проводится бесконтактным способом, следовательно отсутствует искажение температурного поля, вызываемое введением преобразователя в измерительный канал;

б) верхний предел измерения температуры теоретически не ограничен.

Один из первых пирометров изобрел Pieter van Musschenbroeck (1692 - 1761). Изначально термин использовался применительно к приборам, предназначенным для измерения температуры визуально, по яркости и цвету сильно нагретого (раскаленного) объекта. В настоящее время пирометрические методы измерений температуры охватывают широкий диапазон температур — от 173 до 6000 К, включающий в себя низкие, средние и высокие температуры.

С повышением температуры нагретого тела изменяется цвет тела (от темно-красного до белого) и возрастает интенсивность монохроматического (одноцветного) излучения, т.е. излучения определенной длины волны (яркости), а также увеличивается суммарное (интегральное) излучение – радиация.

В зависимости от естественной входной величины пирометры разделяются на *пирометры полного излучения (радиационные пирометры)*, воспринимающие полную (интегральную) энергию излучения; *пирометры частичного излучения (яркостные пирометры)*, основанные на зависимости от температуры энергетической яркости излучения в ограниченном диапазоне длин волн; *пирометры спектрального отношения (цветовые пирометры)*, в которых используется зависимость от температуры отношения спектральных плотностей энергетических яркостей на двух или нескольких длинах волн.



Рис. 18. Внешний вид пирометра излучения

На рис. 18 приведен внешний вид современного пирометра излучения, способного измерять температуру на расстоянии до 30 м. Достаточно просто направить пирометр на объект измерения и нажать кнопку — температура поверхности отобразится на индикаторе.

Вопросы к теме

1. Классифицируйте приборы для измерения температуры по принципу действия.
2. Что положено в основу работы термопар?
3. Расскажите устройство и принцип действия электронного потенциометра.
4. Термометры сопротивления. Вторичные приборы, работающие в комплекте с термометрами сопротивления.
5. Дайте классификацию пирометров излучения, расскажите об их преимуществах.

ТЕМА № 5

5.1. Измерение уровня

Целью измерения уровня жидкости и сыпучих тел является определение количества вещества в емкости и контроль за положением уровня в том или ином производственном аппарате. По характеру работы уровнемеры могут быть непрерывного и прерывистого (релейного) действия. Релейные уровнемеры срабатывают при достижении определенного уровня; они используются для сигнализации и поэтому называются сигнализаторами уровня. Наиболее распространенными приборами для измерения уровня жидкости являются поплавковые, гидростатические, электрические, ультразвуковые, радиоизотопные и радарные уровнемеры.

Поплавковые уровнемеры. В поплавковом уровнемере за уровнем жидкости следит поплавок, перемещение которого передается на показывающее устройство либо преобразовывается в унифицированный выходной сигнал для дальнейшей передачи.

5.2. Гидростатические уровнемеры

В этих приборах измерение уровня жидкости постоянной плотности сводится к измерению давления, создаваемого столбом жидкости.

Измерять гидростатическое давление можно *манометром* (датчиком давления), который подключается к резервуару на высоте, равной нижнему предельному значению уровня (рис. 19).



Рис. 19. Гидростатический уровнемер

Существуют гидростатические уровнемеры с непрерывным продуванием воздуха или газа (*пьезометрические уровнемеры*) и с непосредственным измерением столба жидкости. Пьезометрические уровнемеры (рис. 20) применяются для измерения уровня самых разнообразных, в том числе агрессивных и вязких жидкостей в открытых резервуарах и сосудах под давлением. Сжатый воздух или газ, пройдя дроссель 1 и ротаметр 2, попадает в пьезометрическую трубку 3, находящуюся в резервуаре. Давление воздуха (газа), измеряемое манометром 4 любой системы, характеризует положение уровня жидкости в резервуаре. С начала подачи воздуха давление будет повышаться до тех пор, пока не станет равным давлению столба жидкости высотой H . В момент выравнивания этих давлений из трубки в жидкость начнет выходить воздух, расход которого регулируют так, чтобы он пробулькивал отдельными пузырьками. Величина расхода воздуха устанавливается регулируемым дросселем 1, а контроль осуществляется при помощи ротаметра 2 или путем подсчета количества пузырьков, проходящих через жидкость в контрольном стеклянном сосуде.

Другим видом гидростатических уровнемеров является *дифманометр* любой системы, измеряющий давление столба жидкости в сосуде.

Дифманометрами можно измерять уровень в открытых и закрытых сосудах, т.е. в сосудах, находящихся под давлением и разрежением.

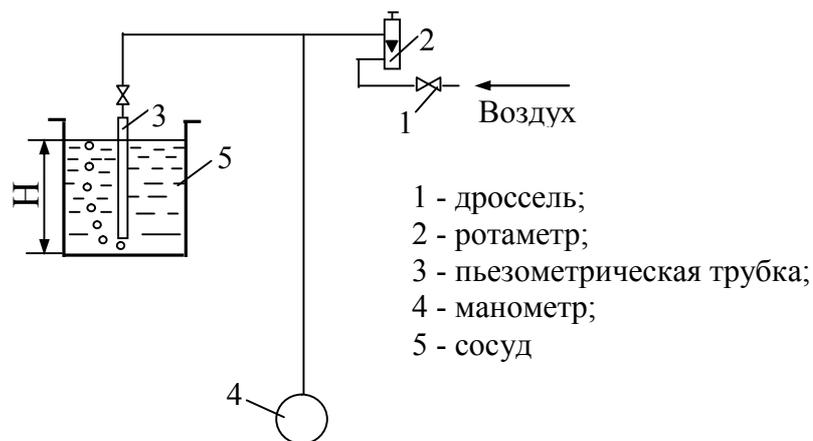


Рис. 20. Пьезометрический уровнемер с продуванием воздуха

5.3. Электрические уровнемеры

В электрических уровнемерах положение уровня жидкости преобразуется в какой-либо электрический сигнал. Из электрических уровнемеров наибольшее распространение получили емкостные и омические. В емкостных уровнемерах используются диэлектрические свойства контролируемых сред; в омических – свойство контролируемой среды проводить электрический ток.

Емкостный уровнемер. Емкостный преобразователь является электрическим конденсатором, емкость которого изменяется в зависимости от изменения уровня жидкости. Принципиальная схема емкостного уровнемера показана рис. 21. В сосуд с жидкостью 1, уровень которой необходимо измерять, опущен электрод 2, покрытый изоляционным материалом. Электрод вместе со стенками сосуда образует цилиндрический конденсатор, емкость которого меняется при колебаниях уровня жидкости. Величина емкости измеряется электронным блоком 3, который затем дает сигнал в блок 4, представляющий собой релейный элемент в схемах сигнализации достижения определенного уровня или показывающий прибор в схемах измерения уровня.

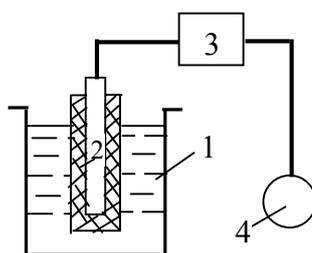


Рис. 21. Схема емкостного уровнемера:
 1 - сосуд с жидкостью; 2 - электрод;
 3 - электронный блок; 4 - релейный блок или измерительный прибор

Омические приборы используются главным образом для сигнализации и поддержания в заданных пределах уровня электропроводных жидкостей (кислот, щелочей). Принцип действия омических сигнализаторов основан на замыкании электрической цепи источника питания через контролируемую среду, представляющую собой участок электрической цепи, обладающей определенным омическим сопротивлением. Практически омические сигнализаторы уровня могут быть применены для сред с проводимостью от $2 \cdot 10^{-3}$ См и выше.

5.4. Радиоизотопные уровнемеры

Положение уровня жидкостей или сыпучих материалов в закрытых емкостях можно контролировать при помощи проникающих γ -излучений. Измерение уровня основано на поглощении γ -лучей при их прохождении через слой вещества.

5.5. Радарные уровнемеры

Уровень измеряется микроволновым бесконтактным методом, иначе его называют радарным. Этот метод, с одной стороны, обеспечивает минимальный контакт измерительного устройства с контролируемой средой, а с другой стороны — практически полностью нечувствителен к изменению её температуры и давления. О возможности использования радиоволн для обнаружения удаленных объектов специалисты задумались еще на заре развития радиотехники.

В 1897 году в ходе экспериментов на море А.С. Поповым было обнаружено явление отражения радиоволн от корпуса судна, пересекающего направление связи.

В настоящее время в радарных системах контроля уровня применяются преимущественно две технологии: с непрерывным частотно-модулированным излучением и импульсным излучением сигнала. Уровнемер излучает микроволновый сигнал, частота которого изменяется непрерывно по линейному закону между двумя значениями. Отраженный от поверхности контролируемой среды (жидкость, сыпучий материал и т.п.) сигнал принимается той же антенной и обрабатывается. Его частота сравнивается с частотой сигнала, излучаемого в данный момент времени. Значение разности частот прямо пропорционально расстоянию до поверхности. Принцип очень прост, но на пути его практической реализации существует множество технических и технологических проблем. Одной из важнейших проблем, непосредственно влияющих на точность измерения, является обеспечение высокой линейности изменения частоты сигнала и особенно ее температурной стабильности, поскольку уровнемеры, как правило, предназначены для эксплуатации в очень широком температурном диапазоне. В радарх импульсного типа используется метод определения расстояния, основанный на непосредственном измерении времени прохождения импульса от излучателя до контролируемой поверхности и обратно. Радарные уровнемеры импульсного типа обладают рядом преимуществ. Во-первых, принимаемые эхо сигналы вне зависимости от природы их источника разнесены во времени, что обеспечивает их более простое разделение. Во-вторых, среднее энергопотребление импульсных уровнемеров составляет единицы микроватт. В-третьих, в импульсных уровнемерах электроника для выполнения первичной обработки сигнала проще, а сама обработка выполняется исключительно аппаратными средствами в результате, благодаря меньшему числу комплектующих надёжность прибора получается потенциально выше.

Конструкция. Одним из самых важных элементов радарного уровнемера является его антенная система. Именно от антенны зависит, какая часть излучённого сигнала достигнет поверхности контролируемого материала и какая часть

отражённого сигнала будет принята и передана на вход электронного блока для последующей обработки. В радарных системах контроля уровня преимущественно используются антенны пяти типов: стержневая; рупорная; трубчатая; параболическая; планарная (рис. 22).



Рис. 22. Радарные уровнемеры

Рупорная и стержневая антенны наиболее широко используются в составе приборов, предназначенных для контроля уровня в технологических установках. Трубчатые антенны применяются в тех случаях, когда выполнение измерения посредством рупорной или стержневой антенны связано с очень большими трудностями или просто невозможно, например, при наличии пены, сильного испарения или высокой турбулентности контролируемой жидкости. Параболические и планарные антенны используются исключительно в составе систем коммерческого учета нефтепродуктов. При контроле уровня в закрытых емкостях, а это наиболее частое применение радарных уровнемеров, антенна, находясь внутри резервуара, подвергается воздействию всех неблагоприятных факторов, которые там только могут присутствовать. К ним относятся и высокое давление, и высокая температура, и агрессивные испарения, и пыль, и т.д. Безусловно, конструкция антенны и материалы, используемые для ее изготовле-

ния, должны всему этому успешно противостоять. Кроме того, конструкция самих резервуаров отличается огромным разнообразием. Электронный блок радарного уровнемера составляет единое целое с антенной системой вследствие особенностей используемого принципа действия. Данный блок отвечает как за формирование зондирующего сигнала, так и за обработку принятого эхосигнала. Измерительная информация (расстояние, уровень, объем и т.п.) может либо просто отображаться на встроенном индикаторе, либо преобразовываться в стандартный токовый сигнал $4 \div 20$ мА с 2-х или 3-х проводной схемой подключения.

5.6. Ультразвуковые уровнемеры

Данные уровнемеры позволяют измерять уровень при отсутствии контакта с измеряемой средой и в труднодоступных местах. В ультразвуковых уровнемерах обычно используется принцип отражения звуковых волн от границы раздела жидкость-газ (воздух). Электрический импульс, преобразованный в ультразвуковой с помощью пьезоэлектрического излучателя, распространяется в жидкой среде, отражается от границы раздела жидкость-воздух, возвращается обратно, воздействуя спустя некоторое время на тот же излучатель, и преобразуется в электрический. Оба импульса, посланный и отраженный, разделенные во времени, поступают на усилитель. Уровень жидкости в резервуаре определяется по времени запаздывания отраженного сигнала относительно посланного.

5.7. Уровнемеры для сыпучих сред

Как было показано выше, для измерения уровня сыпучих сред можно применять радарные и радиоизотопные уровнемеры. Кроме того, применяются уровнемеры с поплавком постоянного погружения. Данные уровнемеры основаны на поддерживающей способности сыпучего тела, выражающейся в

том, что опущенный на открытую поверхность поплавков прибора не проваливается в глубь сыпучего материала.

Весовые уровнемеры сыпучего материала применяются в тех случаях, когда подвеска бункера не вызывает конструктивных осложнений и загрузка и выгрузка материала производится не рывками, а равномерным потоком. В качестве преобразователей в этом случае могут быть использованы различные весовые устройства. Так, в качестве преобразователя предельного уровня, если бункер покоится на опорных пружинах, могут быть использованы конечные выключатели. При нагружении бункера происходят сжатие опорных пружин и линейное перемещение бункера по вертикали. Штанга, укрепленная на бункере, взаимодействуя с конечными выключателями, обеспечивает срабатывание при наполнении и опорожнении бункера.

Также применяются сигнализаторы уровня сыпучих материалов, основанные на применении преобразователей, воспринимающих давление контролируемого вещества. На различной высоте в стенках бункера устанавливаются мембраны. Под давлением сыпучего материала мембрана прогибается, перемещая за собой пружину, которая замыкает контакты. Последние обеспечивают подачу соответствующего электрического сигнала. При понижении уровня пружина возвращает мембрану и контакты в исходное положение.

Лабораторная работа № 7

Измерение уровня буйковым уровнемером

Цель работы: ознакомиться с принципом действия и устройством буйкового уровнемера УБ - Э и провести градуировку вторичного прибора М 1730.

Выполнение работы

На рис. 23 представлена схема для измерения уровня буйковым уровнемером.

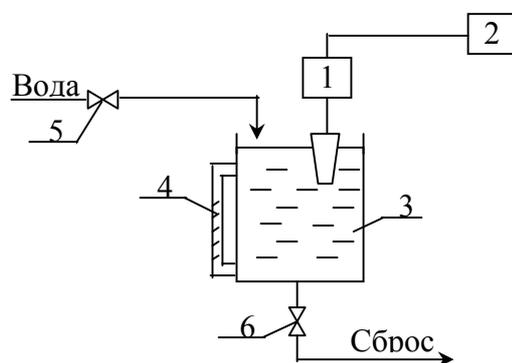


Рис. 23. Буйковый уровнемер

В цилиндрический бак подается вода через вентиль 5, вентиль 6 при этом закрыт. Различные значения уровня можно фиксировать по измерительному стеклу 4. Также уровень измеряется буйковым уровнемером 1 с электрическим выходным сигналом. Электрический сигнал поступает на вторичный прибор – узкопрофильный показывающий милливольтметр 2.

1. Для того чтобы провести градуировку вторичного прибора М 1730, необходимо установить в емкости 3 уровень жидкости, соответствующий начальной точке на шкале вторичного прибора, и одновременно определить действительное значение уровня по измерительному стеклу 4. Записать полученные данные в таблицу.

2. Повторить работу по пункту 1, сначала постепенно повышая уровень жидкости, а затем понижая его. Данные занести в таблицу.

3. Построить график (рис. 24) с экспериментальными точками.

4. Построить на графике прямую с расчетом, чтобы сумма положительных и отрицательных отклонений экспериментальных точек от прямой приближалась к нулю. Максимальное отклонение (абсолютная погрешность измерений), пересчитанное на относительную приведенную погрешность в процентах, определит класс точности уровнемера. Полученное значение округлить до стандартного 1; 1,5; 2 и т.д., превышающего исходное.

Таблица 8

Результаты градуировки

Показания прибора М 1730, % шкалы	Значение уровня в емкости по измерительному стеклу, мм	
	Прямой ход	Обратный ход
1		
2		
3		
4		
5		
6		

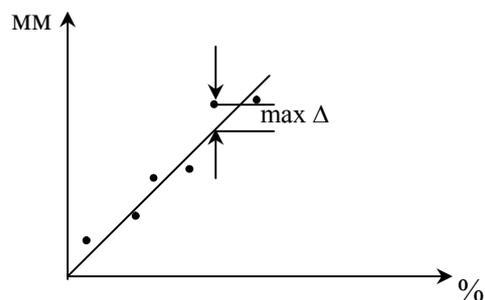


Рис. 24. Градуировочный график

Вопросы к теме

1. Классифицируйте приборы для измерения уровня по принципу действия.
2. Расскажите о гидростатических уровнемерах: пьезометрические приборы, манометры и дифманометры.
3. Электрические приборы: емкостной уровнемер и омический сигнализатор уровня.
4. Расскажите о достоинствах радарных уровнемеров. Антенны для радарных систем.
5. Расскажите, на чем основана работа радиоизотопных и ультразвуковых уровнемеров.
6. Как работают уровнемеры для сыпучих сред?

ТЕМА № 6**6.1. Типовые законы регулирования**

Совокупность объекта регулирования (технологическая установка, аппарат, агрегат и т.д.), датчика, ВИП и автоматического регулятора составляет систему автоматического регулирования (САР). *Регулирование* – это процесс поддержания заданного значения регулируемого параметра. Опыт эксплуатации

промышленных САР позволил выделить ограниченное количество законов регулирования, которые получили широкое распространение и которые называются типовыми.

Интегральный регулятор (сокращенно И-регулятор)

И-регулятор производит перемещение регулирующего органа $X_p(\tau)$ пропорционально интегралу отклонения регулируемой переменной $X_{\text{вых}}(\tau)$ от заданного значения – $X_{\text{зад}}$ (ошибки регулирования $e(\tau)$):

$$X_p(\tau) = K_p \int_0^{\tau} e(\tau) d\tau, \quad (19)$$

где K_p - коэффициент передачи регулятора.

Передаточная функция регулятора представляет собой передаточную функцию интегрирующего элемента:

$$W_p(p) = \frac{K_p}{p}, \quad (20)$$

где p - комплексная переменная.

Пропорциональный регулятор (сокращенно П-регулятор)

П-регулятор производит перемещение регулирующего органа пропорционально ошибке регулирования:

$$X_p(\tau) = K_p e(\tau). \quad (21)$$

Коэффициент K_p называют коэффициентом передачи регулятора. Он численно равен перемещению регулирующего органа при отклонении регулируемой переменной на единицу измерения.

Передаточная функция регулятора:

$$W_p(p) = K_p. \quad (22)$$

Пропорционально-интегральный регулятор (сокращенно ПИ-регулятор)

ПИ-регулятор производит перемещение регулирующего органа пропорционально отклонению и интегралу отклонения регулируемой переменной от заданного значения.

$$X_p(\tau) = K_p \left[e(\tau) + \frac{1}{T_u} \int_0^{\tau} e(\tau) d\tau \right]. \quad (23)$$

Постоянная величина T_u , имеющая размерность времени, характеризует степень ввода в закон регулирования интеграла и называется временем изодрома. В динамическом отношении ПИ-регулятор подобен системе из двух параллельно включенных регуляторов:

- пропорционального с коэффициентом передачи K_p ;
- интегрального с коэффициентом K_p / T_u .

При беспредельном увеличении времени изодрома ПИ-регулятор превращается в П-регулятор.

Если устремить K_p и T_u к нулю, так чтобы их отношение оставалось постоянным, ПИ-регулятор по свойствам будет стремиться к И-регулятору с коэффициентом передачи K_p / T_u .

Передаточная функция ПИ-регулятора:

$$W_p(p) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_u p} \right]. \quad (24)$$

Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор

(сокращенно ПИД-регулятор)

ПИД-регулятор производит перемещение регулирующего органа пропорционально отклонению, интегралу отклонения и скорости отклонения регулируемой переменной от заданного значения.

$$X_p(\tau) = K_p \left[e(\tau) + \frac{1}{T_u} \int_0^{\tau} e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(\tau)}{d\tau} \right]. \quad (25)$$

Постоянная T_d , имеющая размерность времени, характеризующая степень ввода в закон регулирования производной, называется временем предварения. В динамическом отношении эти регуляторы подобны системе из трех параллельно включенных звеньев: пропорционального, интегрального и дифференциального.

При $T_d = 0$ ПИД-регулятор превращается в ПИ-регулятор.

Передаточная функция регулятора определяется выражением:

$$W_p(p) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_u p} + T_d p \right]. \quad (26)$$

6.2. Переходный процесс в системах автоматического регулирования

Выбор того или иного закона регулирования зависит от свойств объекта и от критериев качества, заданных при синтезе системы. Для устойчивого объекта качество регулирования, по существу, определяется соотношением $\tau_3 / T_{об}$, где τ_3 – время запаздывания объекта управления, $T_{об}$ – постоянная времени объекта управления. Далее в лабораторной работе будет показано, как τ_3 и $T_{об}$ определить экспериментально. Соотношение $\tau_3 / T_{об}$ определяет долю чистого запаздывания в общей инерционности объекта. Чистое запаздывание τ_3 ведет к невозвратимой потере информации. Существуют ориентировочные рекомендации по выбору закона регулирования на основании соотношения $\tau_3 / T_{об}$ [3].

Рекомендуется применять при

$0,2 \leq \tau_3 / T_{об} < 0,3$ – П-регулятор;

$0,3 \leq \tau_3 / T_{об} \leq 1$ – ПИ-регулятор.

При $\tau_3 / T_{об} < 0,2$ можно применить так называемые позиционные законы регулирования.

При $\tau_3 / T_{об} > 1$ необходимо применять ПИД-регулятор или специальные законы.

Для расчета настроек регулятора широко применяются инженерные полумпирические методы (табл. 9), при этом учитываются критерии качества переходного процесса: τ_p – время регулирования, ψ – степень затухания, I_2 – квадратичный критерий качества. Дадим их определения.

Переходный процесс это реакция системы (в нашем случае объекта с регулятором) на единичное ступенчатое воздействие (рис. 25).

Время регулирования (τ_p) – время, которое понадобилось, чтобы выходная величина ($x_{\text{вых}}(\tau)$) вошла в коридор допустимых отклонений ($x_{\text{зад}} \pm \Delta$). Коридор допустимых отклонений это по сути регламентный коридор, который устанавливается для каждого технологического параметра.

$$\text{Степень затухания } \Psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1}.$$

$$\text{Квадратичный критерий качества } I_2 = \int_0^{\infty} (x_{\text{вых}}(\tau) - x_{\text{зад}})^2 d\tau;$$

I_2 – это площадь, заключенная между графиком переходного процесса $x_{\text{вых}}(\tau)$ и заданным значением $x_{\text{зад}}$, это по сути энергетический показатель, и он должен стремиться к минимуму.

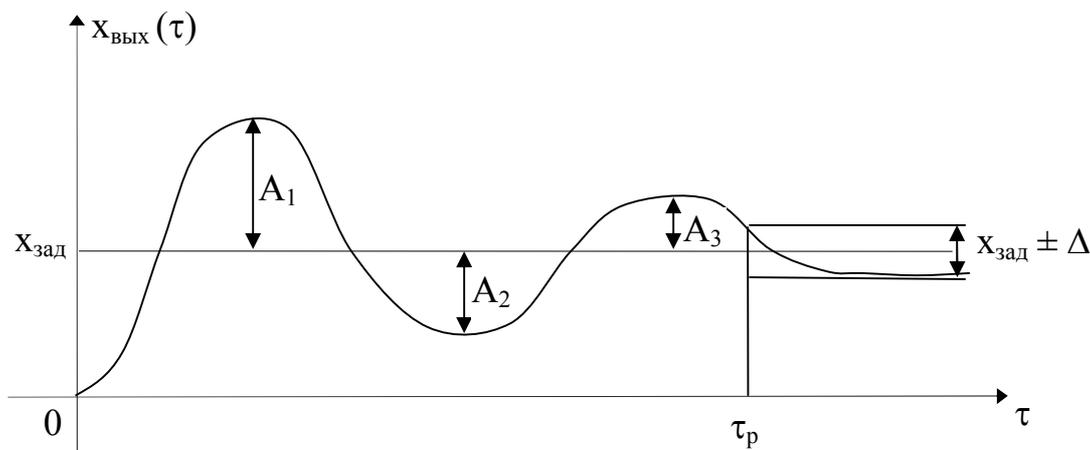


Рис. 25. График переходного процесса

Так, для апериодического объекта с запаздыванием для двух типов регуляторов (П и ПИ), с учетом вида переходного процесса, можно применить формулы, приведенные в табл. 9:

Расчетные формулы настроек регуляторов

Тип регулятора	Тип переходного процесса		
	Апериодический с $\min \tau_p$	Затухающий колебательный $\psi = 0,9$	Затухающий колебательный $\psi = 0,75$ $I_2 \rightarrow \min$
П	$K_p = \frac{0,3}{K \tau_3 / T_{об}}$	$K_p = \frac{0,7}{K \tau_3 / T_{об}}$	$K_p = \frac{0,9}{K \tau_3 / T_{об}}$
ПИ	$K_p = \frac{0,6}{K \tau_3 / T_{об}}$ $T_{и} = 0,8 \tau_3 + 0,5 T_{об}$	$K_p = \frac{0,7}{K \tau_3 / T_{об}}$ $T_{и} = \tau_3 + 0,3 T_{об}$	$K_p = \frac{1}{K \tau_3 / T_{об}}$ $T_{и} = \tau_3 + 0,35 T_{об}$

Лабораторная работа № 8**Исследование динамических характеристик объекта управления**

Цель работы: изучить динамические характеристики теплового объекта. Выбрать типовой регулятор и рассчитать настроечные параметры регулятора.

Выполнение работы

1. Изучить стенд с тепловым объектом. Схема автоматизации, выполненная согласно ГОСТ 21.404–85, представлена на рис. 26. Спецификация приборов, размещенных на стенде, приведена в таблице 10.

Тепловой объект представляет собой тепловую пушку 1 (рис. 26). На вход объекта центробежным вентилятором подается воздух, который нагревается электронагревательным элементом 2. Выходная управляемая переменная объекта – температура воздуха на выходе.

Канал управления: изменение тока спирали – изменение температуры воздуха на выходе объекта.

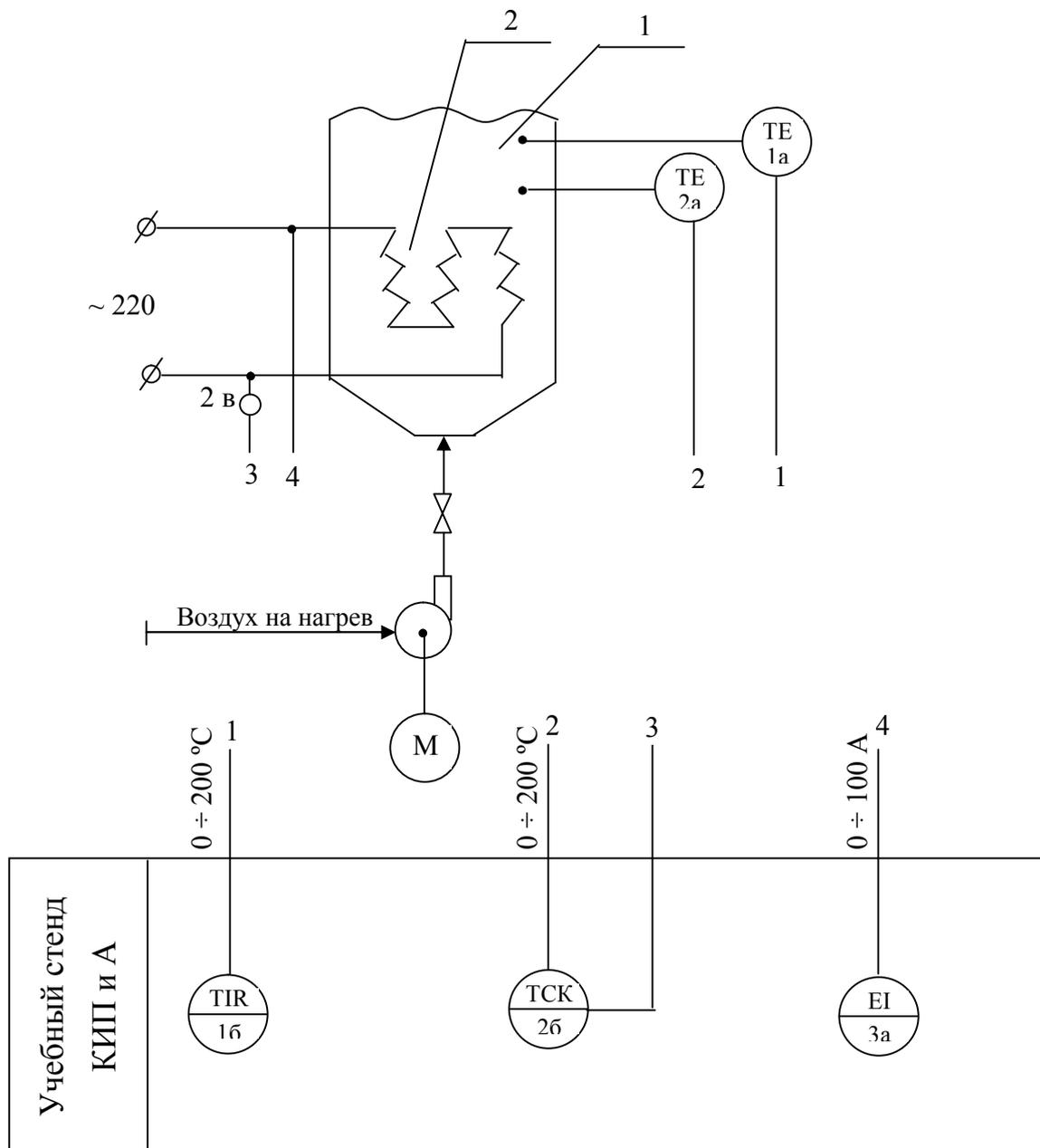


Рис. 26. Схема автоматизации теплового объекта

2. Снять кривую разгона объекта управления по динамическому каналу: ток спирали – температура на выходе теплового объекта, для этого:

а) поддерживают установившийся режим протекания процесса при отключенном регуляторе;

б) вносят ступенчатое возмущение мгновенной перестановкой регулирующего органа в пределах $10 \div 20 \%$ от максимального значения входной величины;

в) с помощью самопишущего прибора регистрируют реакцию объекта на возмущающее воздействие.

Таблица 10

Спецификация на приборы и средства автоматизации

№ поз. по схеме	Наименование и краткая характеристика прибора
1а	Датчик температуры - термопара хромель-копелевая,
1б	Вторичный показывающий и регистрирующий прибор - автоматический потенциометр КСП-4,
2а	Датчик температуры – термопара платинородиевая-платина,
2б	Высокоточный регулятор температуры ВРТ-01 со станцией контроля и управления,
2в	Исполнительный механизм – регулятор напряжения РН-63,
3а	Амперметр показывающий Э59К.

3. Обработать кривую разгона (см. рис. 27), при этом определить коэффициент передачи объекта управления $K_{об} = \frac{X_{вых}(\infty)}{X_{вх}(\infty)}$, где $X_{вых}(\infty)$ – установившееся значение выходной величины, выраженной в процентах от максимального значения шкалы прибора; $X_{вх}(\infty)$ – входное возмущающее воздействие, выраженное в процентах от максимального значения изменения регулирующего органа.

4. Постоянную времени $T_{об}$ и время запаздывания τ_3 определить графически. $T_{об}$ и τ_3 это временные характеристики. Для их определения измеряем на графике значения в миллиметрах. Зная скорость движения диаграммной ленты $v = 2400$ мм/ч, определяем $T_{об}$ и τ_3 (единицы измерения с).

5. Записать передаточную функцию объекта управления в виде:

$$W_{об}(p) = \frac{K_{об}}{T_{об} \cdot p + 1} e^{-p\tau_3},$$

где $K_{об}$, $T_{об}$ и τ_3 величины, рассчитанные в результате обработки кривой разгона. Определить, из каких типовых звеньев состоит исследуемый объект.

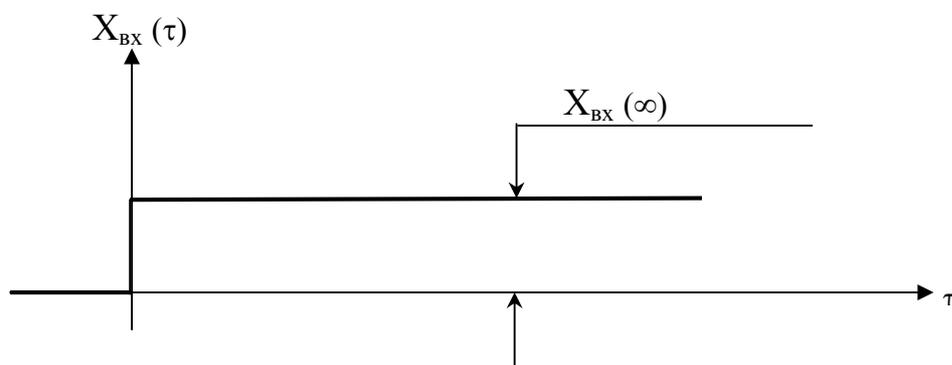
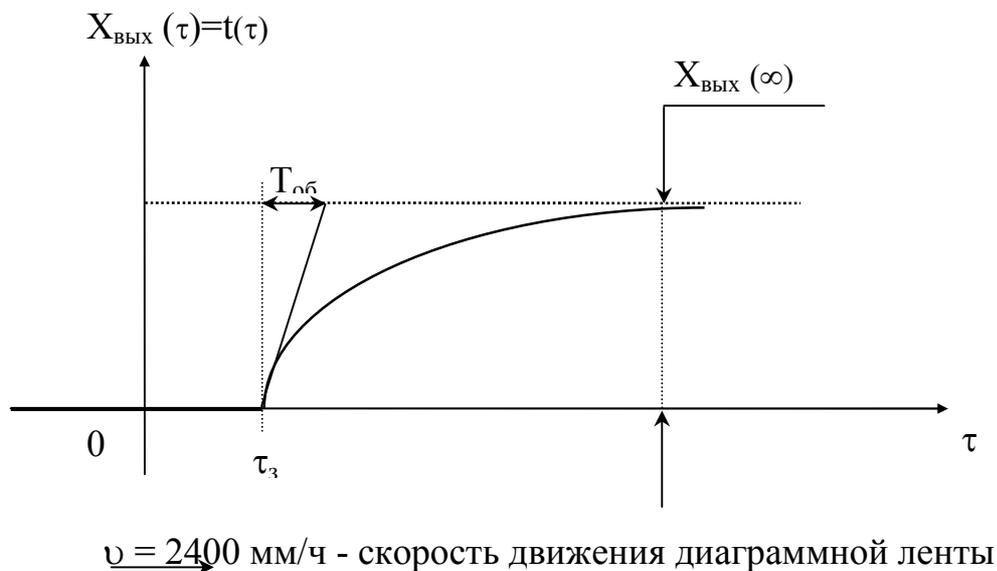


Рис. 27. Кривая разгона по каналу:
ток спирали – температура на выходе теплового объекта

6. Зная соотношения $\tau_3 / T_{об}$, выбрать типовой регулятор и, пользуясь табл. 9, определить настроечные параметры регулятора (тип переходного процесса и критерии качества задаются преподавателем).

7. Сделать выводы по работе.

Вопросы к теме

1. Расскажите о типовых регуляторах.
2. Что такое параметры настройки регулятора?
3. Дайте определение переходного процесса в системе регулирования. Чем определяется выбор закона регулирования?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулаков, М.В. Технологические измерения и приборы для химических производств: учебник для вузов/ М.В. Кулаков. – 3-е изд., перераб. и доп. –М.: Машиностроение, 1983. – 424 с.
2. Новицкий, П.В. Оценка погрешностей результатов измерений / П.В. Новицкий, И.А. Зограф. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат; Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.
3. Головушкин, А.А. Теория автоматического управления: Ч. 1. Линейные системы автоматического управления: учеб. пособие / А.А. Головушкин, Б.А. Головушкин; Иван. гос. хим.-технол. академ. – Иваново, 1993. – 80 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ТЕМА № 1. Измерения, измерительные приборы, погрешности измерительных приборов.....	4
ТЕМА № 2. Измерение давления	9
ТЕМА № 3. Измерение расхода	15
ТЕМА № 4. Измерение температуры	29
ТЕМА № 5. Измерение уровня	45
ТЕМА № 6. Типовые законы регулирования	54
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	63

Составитель
Ерофеева Елена Владимировна

**СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
Методические указания к лабораторному практикуму**

Технический редактор О.А. Соловьева

Подписано в печать 16.10.2010. Формат 60 × 84 $\frac{1}{16}$. Бумага писчая.

Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 4,13. Тираж 400 экз. Заказ

Ивановский государственный
химико-технологический университет

Отпечатано на полиграфическом оборудовании кафедры экономики
и финансов ГОУ ВПО "ИГХТУ"

153000, г. Иваново, пр. Ф. Энгельса, 7.