

Раздел III

Методы измерения ТП

Требования к приборам и аппаратуре контроля для измерения ТП

Приборы для измерения ТП

Методы измерения технологических параметров

«Наука – полководец, а практика – его солдаты»

Леонардо да Винчи, 1512

«Система управления – капитан, а датчики – солдаты»

Yokogawa Electric Corporation, 1988

Значение измерительной техники в современном производстве

В настоящее время создание АСУТП высокотехнологичных производств невозможно без системы автоматического контроля, позволяющей получать информацию

о параметрах процессов,
качестве сырья, промежуточных и конечных продуктов.

В нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической и радиоэлектронной отраслях затраты на измерительную технику достигают **25%** от всех затрат производства.

Основные понятия

Принцип измерения (принцип действия) – физическое явление или эффект, положенный

в основу измерения.

(например, использование силы тяжести при измерении массы тела при его

взвешивании,

применение эффекта Доплера для измерения скорости,
звукоскорости при радарном измерении температуры)

Метод измерения – совокупность приемов и способов измерения принципов

и средств измерений.

Классификация методов измерения



по способу сравнения размера величины с единицей
прямые
косвенные

$$G_V = V_{cp} \cdot S$$

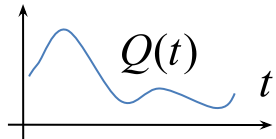
$P_{атм}$

по характеру изменения измеряемой величины во времени
статические
динамические

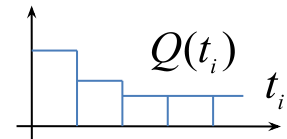
$$P(t)$$



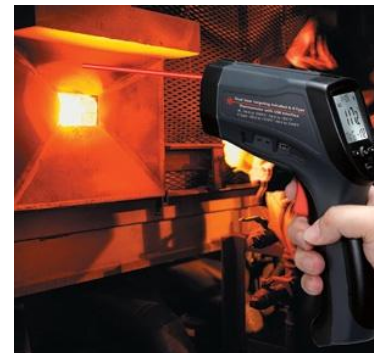
по форме представления измеряемой величины
аналоговые
цифровые



по отбору отсчетов во времени
непрерывные
дискретные (прерывистые)



по взаимодействию с объектами измерения
контактные
бесконтактные



по используемым физическим эффектам
Зеебека, Кориолиса, электромагнитной индукции и т.д.

Классификация методов измерения

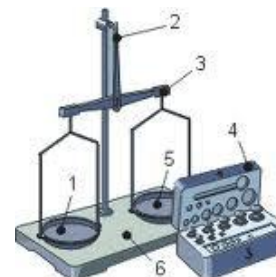
по способу сравнения измеряемой величины с ее единицей

Метод непосредственной оценки



Методы сравнения с мерой

Дифференциальный метод
Компенсационный (нулевой) метод



Метод непосредственной оценки - нахождение значения измеряемой величины по

отсчетному устройству ИП прямого действия.



Рисунок 1 – Функциональная схема измерения методом непосредственной оценки

Примеры:

измерение давления пружинным прибором
массы на циферблатных или пружинных весах
силы тока амперметром
разности фаз цифровым фазометром и т.д.

Точность такого метода ограничена, но быстрота процесса измерения делает его незаменимым для практического измерения.

Средства измерения:

В основном, показывающие приборы, в том числе и стрелочные приборы (манометры, расходомеры, вольтметры и др.).

Группа **методов сравнения с мерой** – методы измерения, в которых измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой.

По сравнению с методом непосредственной оценки более точны, но несколько сложны.

К этой группе методов относятся методы:

**противопоставления,
компенсационный (нулевой),
дифференциальный,
совпадения,
замещения.**

+ можно использовать приборы с относительно небольшими диапазонами показаний, вплоть до вырожденной шкалы с одной нулевой отметкой.

Дифференциальный метод - заключается в определении разности между измеряемой и известной величиной, после чего измеряемая величина находится путем алгебраического сложения.

Метод широко используется для измерений при наличии мешающих компонентов - шумов, сопутствующих компонентов при определении состава смеси и т.д.

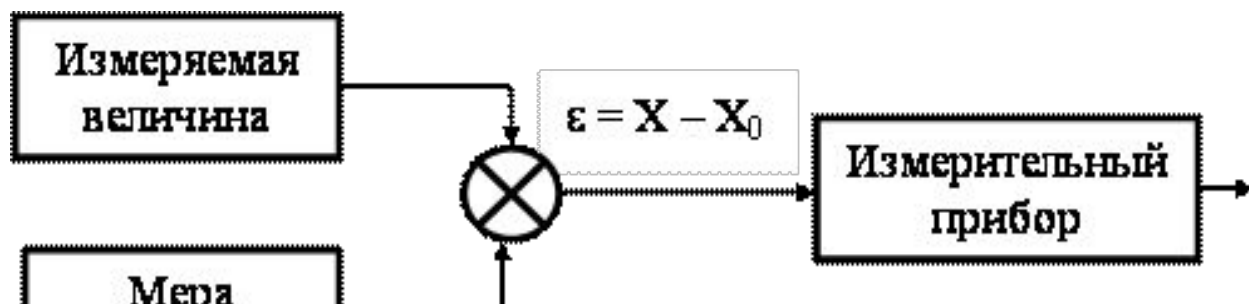


Рисунок 2 – Функциональная схема дифференциального метода измерения

Дифференциальный метод измерений превращается в **нулевой метод измерений**, если разность между измеряемой и известной величинами доводят до нуля.

Компенсационный (нулевой) метод - состоит в уравнивании неизвестной измеряемой величины известной.

При нулевом методе результирующий эффект воздействия величин на прибор сравнения доводят до нуля.



Примеры:

уравновешенный мост,
рычажные весы.

Рисунок 3 – Функциональная схема компенсационного метода измерения

Применяют, когда необходимо измерить физические явления без нарушения условий, в которых они протекают, например, измерение ЭДС нормальных элементов в отсутствие в них тока.

Обеспечивает достаточно высокую точность.

Требования к приборам и аппаратуре контроля для измерения технологических параметров

«Точность – вежливость поваров»

А.С. Пушкин

Главное требование, предъявляемое к промышленным приборам контроля – **способность формировать сигналы для связи с системой**

управления

это и отличает их от бытовых и лабораторных приборов



Точность – степень достоверности показаний, т.е. характеристика того, насколько

результаты измерений отличаются от истинных значений

измеряемой

величины.



Чувствительность – отношение линейного или углового перемещения указателя к

перемещению измеряемой величины, вызвавшему это

перемещение.

$$\frac{\Delta Y}{\Delta X}$$

$$\Delta Y$$

$$\Delta X$$

- Изменение выходной величины

- Изменение входной величины



Порог чувствительности - наименьшее изменение значения измеряемой величины, способное вызвать малейшее изменение показания измерительного прибора.

Порог чувствительности обусловлен в частности наличием трения в механизмах прибора. Выражается в долях от допускаемой основной погрешности.

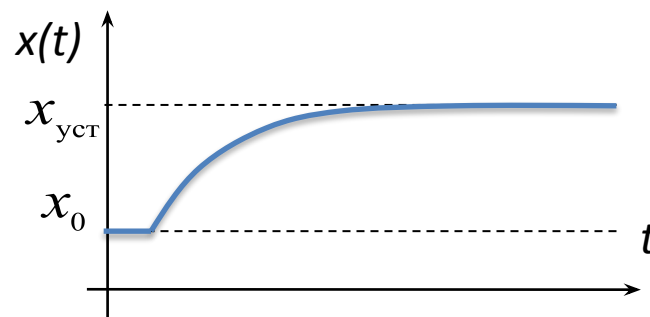


Быстродействие прибора зависит от его инерционности, вызывающей запаздывание показаний. Характеризует время с момента начала изменения измеряемой величины до момента показания его прибором.

Инерционность вызывается тепловыми, механическими и гидравлическими факторами.

$$\frac{dx(t)}{dt} = \gamma \cdot (x_{уст} - x(t))$$



$$x(t) = x_{уст} - (x_{уст} - x_0) \cdot e^{-\gamma \cdot t}$$



γ - коэффициент инерционности,
с⁻¹

Надежность прибора – его свойство сохранять работоспособность в течение заданного времени. Часто в технической документации на прибор указывается вероятность безотказной его работы в заданном интервале времени.

Основные показатели надежности прибора:

- $p \rightarrow 1$ **вероятность безотказной работы** в течение заданного времени,
-  **наработка на отказ** (среднее время между двумя неисправностями),
-  **частота отказов**.

Класс точности - обобщенная характеристика, определяемая пределами допускаемой основной и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность.

$$K = \pm \frac{\Delta}{X_{\max} - X_{\min}} \cdot 100\%$$

Δ - Абсолютная погрешность
 $X_{\max} - X_{\min}$ - Разность верхнего и нижнего пределов измерения, т.е. диапазон измерений

Класс точности прибора устанавливают при выпуске, градуируя его по образцовому прибору в нормальных условиях.

Средствам измерения присваивают классы точности из ряда чисел:

(1 1,5 1,6* 2 2,5 3* 4 5 6) · 10ⁿ,

где $n=1; 0; -1; -2$ и т.д.

* - не устанавливается для вновь разрабатываемых средств измерения

Варианты обозначения класса точности на измерительных приборах

1,5

1,5

1,5

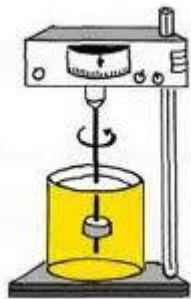
Таблица 1 – Обозначение класса точности на измерительных приборах

| Обозначение класса точности | | Форма выражения погрешности | Пределы допускаемой основной погрешности | Примечание |
|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| на средстве измерений | в документации | | | |
| 0,5 | Класс точности 0,5 | Приведенная | $\gamma = \frac{\Delta}{X_{\max}} = \pm 0,5\%$ | Нормирующее значение выражено в единицах измеряемой величины |
| $\sphericalangle 0,5$ | Класс точности 0,5 | | $\gamma = \frac{\Delta}{X_{\max} - X_{\min}} = \pm 0,5\%$ | Нормирующее значение принято равным длине шкалы или её части |
| $\textcircled{0,5}$ | Класс точности 0,5 | Относительная | $\delta = \frac{\Delta}{x_{\text{изм}}} = \pm 0,5\%$ | Общий вид $\frac{\Delta}{x_{\text{изм}}}$ |
| 0,02/0,01 | Класс точности 0,02/0,01 | | $\delta = \pm \left[0,02 + 0,01 \left(\frac{X_{\max}}{x_{\text{изм}}} - 1 \right) \right]$ | Общий вид $\delta = \pm \left[c + d \left(\frac{X_{\max}}{x_{\text{изм}}} - 1 \right) \right]$ |

Приборы для измерения технологических параметров

«Высоты ума не измерить линейкой ширины глупости»

В. Галашев



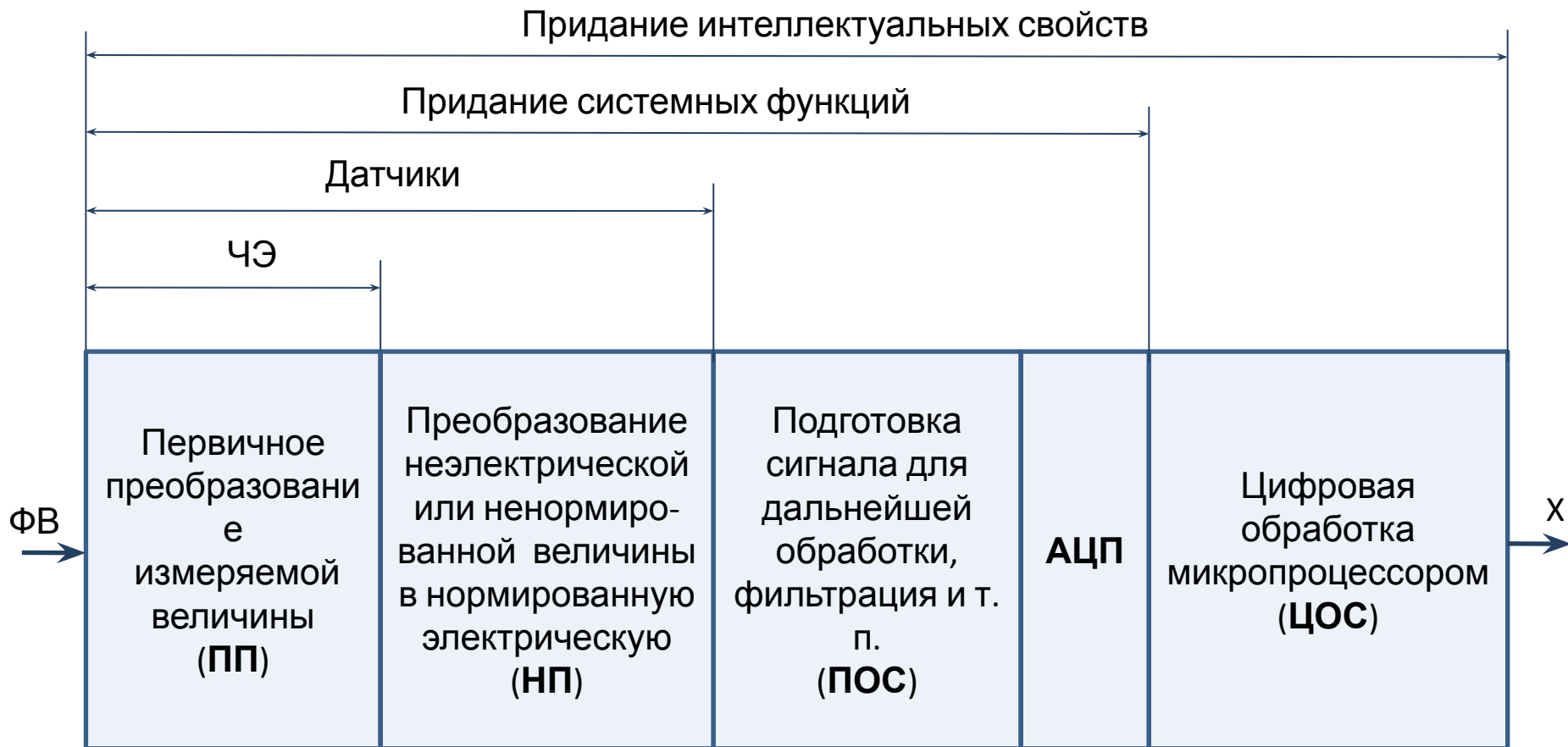


Рисунок 1 – Этапы развития и совершенствования датчиков (Х.Харт)

Каждый ПП физико-химической величины имеет выходной сигнал своего диапазона.

Чтобы избежать разнообразия вторичных приборов, датчики оснащаются НП, которые преобразуют различные сигналы ПП в унифицированные сигналы постоянного тока, напряжения, частоты и др.

Таблица 2 – Унифицированные сигналы (по ГСП)

| Вид сигнала | Физическая величина | Параметры сигнала |
|----------------|-----------------------|------------------------------------------------|
| Электрический | Постоянный ток | 0÷5; 0÷20; -5÷0÷5; 4÷20 мА |
| | Постоянное напряжение | 0÷10; 0÷20; -10÷0÷10 мВ 0÷10; 0÷1; -1÷0÷1 В |
| | Переменное напряжение | 0÷2; -1÷0÷1 В |
| | Частота | 2÷8; 2÷4 кГц |
| Пневматический | Давление | 0,02÷0,1 МПа |
| Гидравлический | " | 0,1÷6,4 Мпа |

Около 80% всех измерений приходится на датчики температуры давления, расхода, уровня

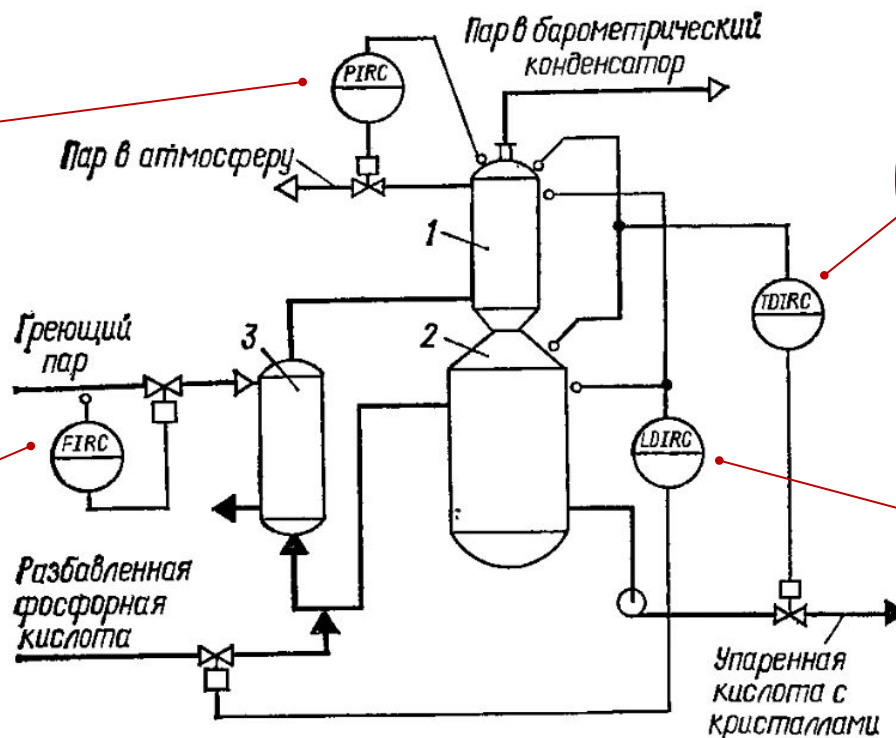
Остальные 20% - измерения состава, э/м измерения и др.



Давление P



Расход F



Температура t°



Уровень L

Рисунок 2 – Схема автоматизации выпарного кристаллизатора

Датчики уровня применяются практически во всех областях промышленности, связанных с продукцией, которая имеет сыпучее или жидкое состояние.

Для измерения **жидких сред** (80% измерений) выпускаются датчики уровня различного принципа действия:

поплавковые (25%)

емкостные (15%)

ультразвуковые

лазерные

радарные

вибрационные

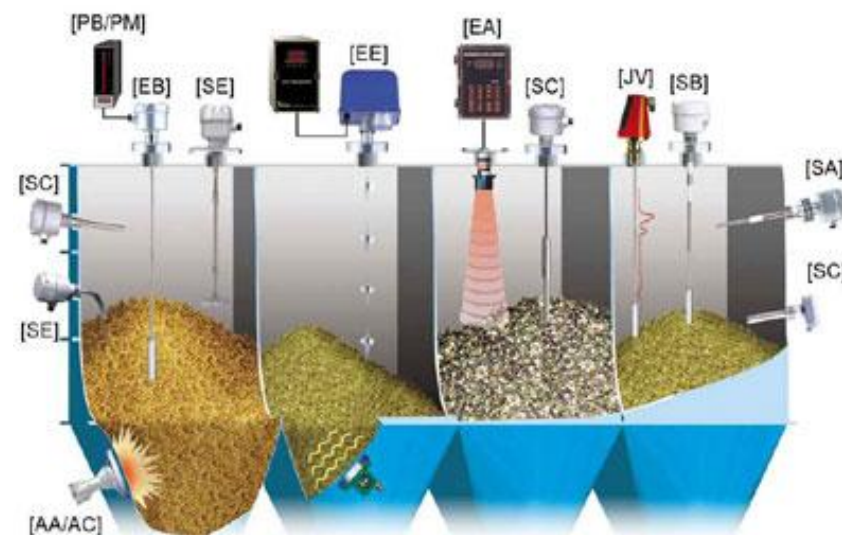
оптические

на основе микроволн.... и т.д.



Для химической промышленности имеются специальные решения для высокотемпературных сред и со взрывозащитной.

Для измерения **сыпучих сред** используются датчики
электромеханические
вибрационные
ультразвуковые
емкостные
лазерные
радарные... и т.д.



Факторы, определяющие выбор типа датчика уровня:

- Может ли датчик уровня встраиваться в резервуар?
- Допускается ли контакт датчика с контролируемой средой?
- Необходим непрерывный контроль уровня или достаточно измерять наличие продукта в пороговых точках (сигнализация)?
- Возможно, ли будет регулярное техническое обслуживание?
- Совместим ли физический принцип работы датчика с решаемой задачей измерения? (Например, при выборе емкостного датчика уровня важно знать диэлектрическую проницаемость среды)
- Какие ограничения накладывает контролируемый процесс: температура, давление, влажность, агрессивность среды?



Емкостной сигнализатор уровня

Порогов
й

Непрерывны
й



Поплавковые датчики уровня

Температурные измерения являются самыми распространенными (50% всех измерений на производстве).

Например:

На АЭС – более 1500 контрольных (измерительных) точек температуры,

На крупном химвиробудовании – 20000.

При выборе датчиков температуры следует учесть:

- Возможность погружения датчика в измеряемую среду или объект
- Условия измерений: агрессивность среды, влажность, давление и т.д.
- Время работы без замены и калибровки (некоторые типы датчиков обладают относительно низкой долговременной стабильностью, например термисторы)
- Необходимый тип выходного сигнала
- Время срабатывания, напряжение питания, разрешение датчиков и погрешность
- Тип корпуса (для полупроводниковых датчиков)



Термистор — полупроводниковый элемент, сопротивление которого существенно зависит от температуры. Температурный коэффициент сопротивления термистора от $-2,4$ до $-8,4 \text{ K}^{-1}$ в десятки раз превышает температурный коэффициент сопротивления у металлов ($+0,38 \text{ K}^{-1}$ для платины).

Датчики температуры



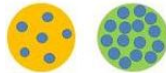


- (1) **Термометры сопротивления** для измерения температуры с точностью до сотых долей градуса
- (2) **Термопары** могут измерять температуры от криогенных до полутора тысяч градусов
- (3) **Пирометры** - бесконтактные датчики температуры позволяют измерять температуру на расстоянии, не касаясь объекта измерений
- (4) **Биметаллические термостаты*** - недорогие и небольшие размером реле температуры, миниатюрные

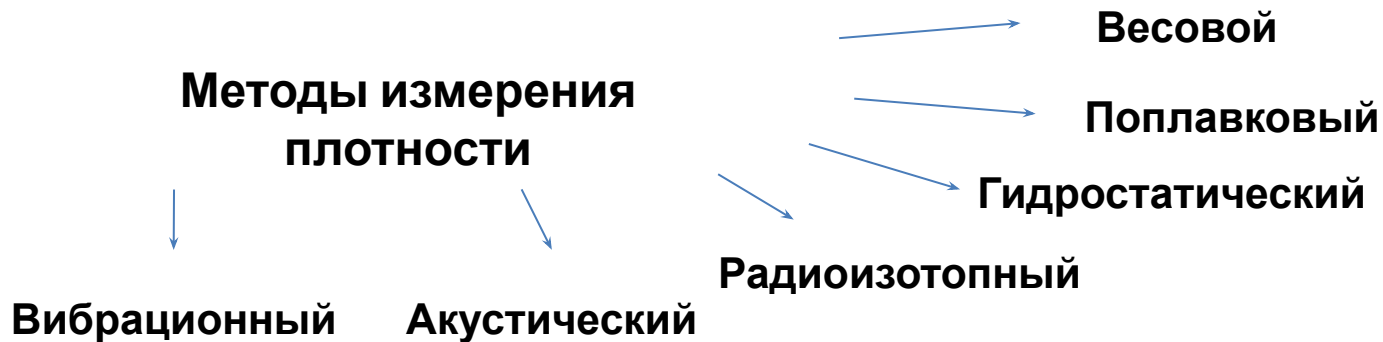


* Принцип работы термостата основан на принципе деформации биметаллического диска. При достижении t срабатывания би-металл изгибается и воздействует на рычаг замыкающий электрическую цепь. При охлаждении термостата би-металл принимает первоначальную форму - контакты размыкаются.

Физико-химические свойства вещества

Для обеспечения правильного хода ТП в ХП необходимо определять физические или физико-химические параметры, характеризующие свойство или качество исходного материала, полупродукта или готового продукта

| Физико-химический параметр | | Контролируемая среда | Приборы |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|
|  | ρ Плотность | Жидкие среды, пульпы, газы | Плотномеры, ареометры |
|  | pH Кислотность | Растворы | pH-метры |
|  | C Концентрация | Растворы, газовые смеси | Концентратомеры, анализаторы состава |
|  | φ Влажность | Газы | Влагомеры |
|  | η Вязкость | Текущие среды, газы | Вискозиметры |



Весовые плотномеры

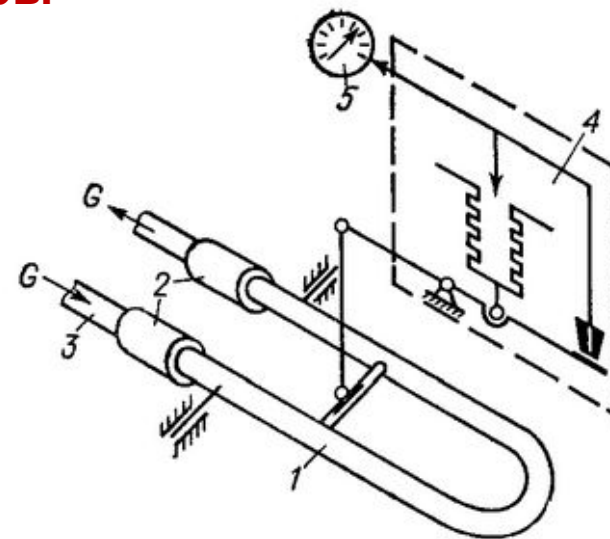
Принцип действия

Измерение массы постоянного объема контролируемой жидкости

+ Постоянное сечение трубки и большая скорость движения жидкости исключает осаждение взвешенных твердых частиц

Описание работы схемы

При увеличении плотности жидкости в основном трубопроводе 3 вес петлеобразной трубки 1 на гибком сочленении 2 увеличивается, она опускается. Сигнал перемещения через пневматический усилитель 4 передается на вторичный прибор 5.



Пример 1 – Схема весового плотномера с пневматическим преобразователем

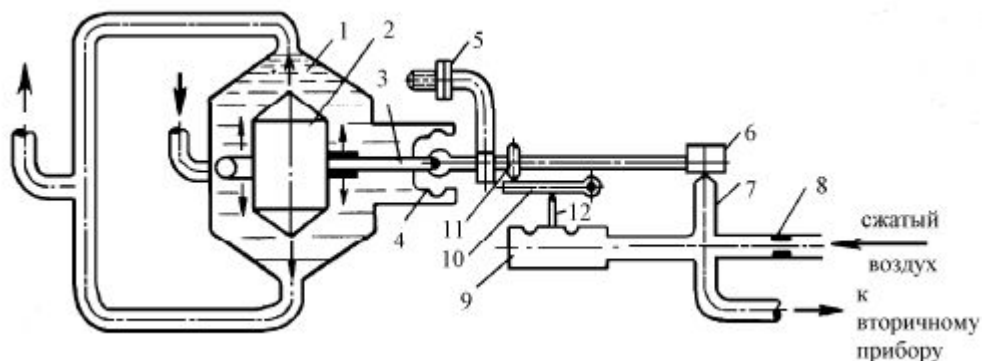
Поплавковые плотномеры

Принцип действия

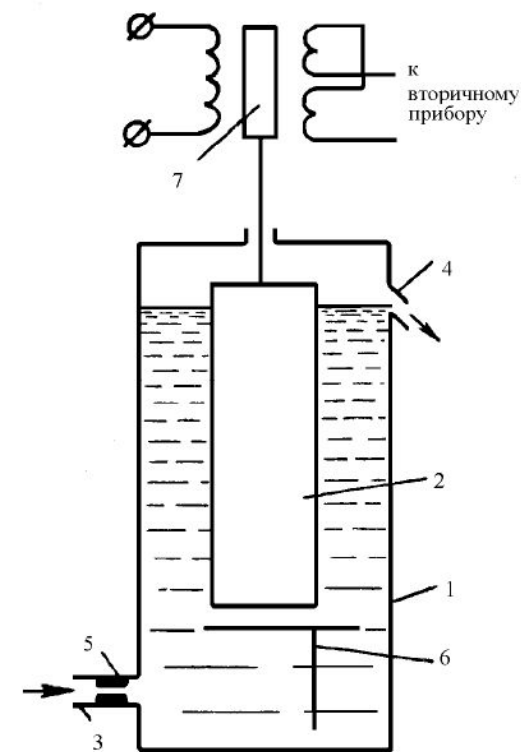
Мерой плотности служит глубина погружения поплавка (ареометры постоянного веса) или действующая на него выталкивающая сила, пропорциональная плотности жидкости (ареометры постоянного объема)

Промышленные приборы

ДУВ (датчик удельного веса), ПЖК
 $0,5 - 2,5 \text{ г/см}^3$



Пример 3 – Схема ареометра постоянного объема с пневматическим преобразователем



Пример 2 – Схема ареометра постоянного веса

Гидростатические плотномеры

Принцип действия

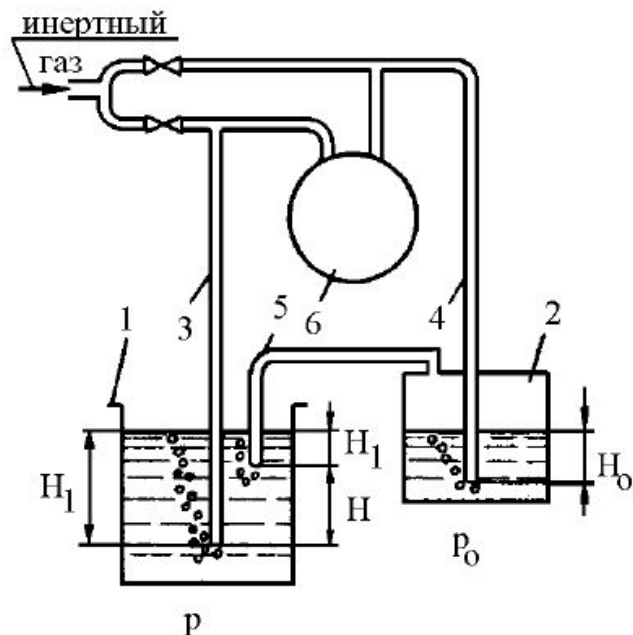
Давление столба жидкости постоянной
высоты является мерой плотности жидкости

- 1 – сосуд для исследуемой жидкости
- 2 – сосуд с эталонной жидкостью
- 3,4,5 – трубки
- 6 – дифманометр

Описание работы схемы

Инертный газ по трубке 3 проходит через слой исследуемой жидкости постоянной высоты. Тот же газ по трубке 4 проходит через слой эталонной жидкости постоянной высоты, а затем по дополнительной трубке 5 газ проходит через небольшой слой исследуемой жидкости. Показание дифференциального манометра 6 является мерой плотности исследуемой жидкости.

+ Прохождение газа через небольшой слой исследуемой жидкости обеспечивает независимость показаний плотномера от колебания уровня жидкости в сосуде 1.



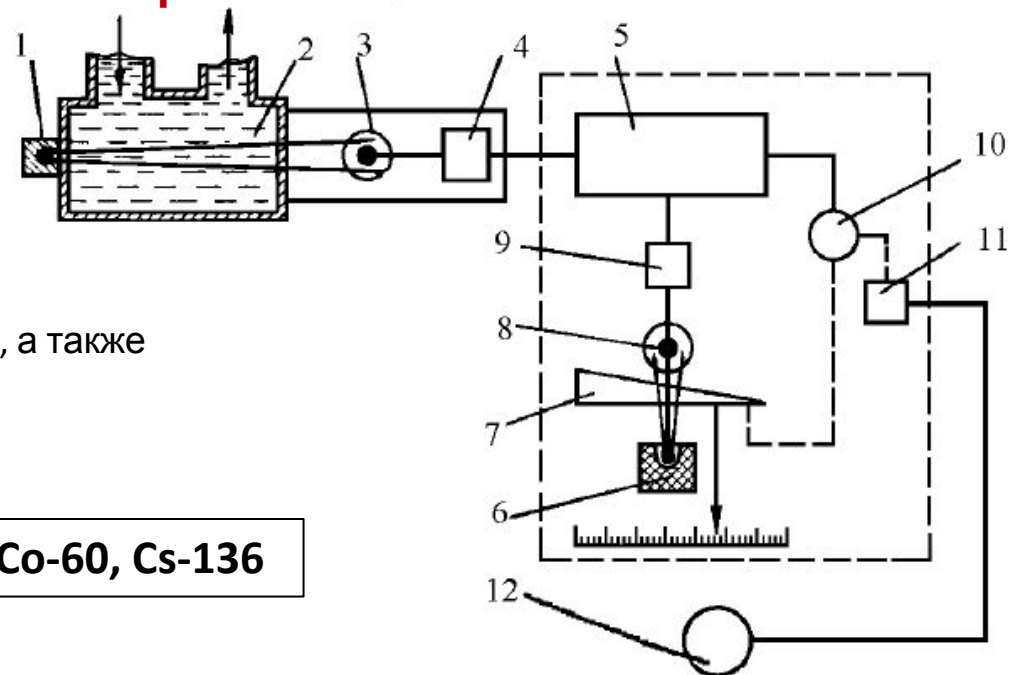
Пример 4 – Схема плотномера непрерывной продувки газа

Радиоизотопные плотномеры

Принцип действия

Изменение интенсивности пучка γ -лучей после прохождения его через измеряемую среду

+ бесконтактное измерение плотности агрессивных или весьма вязких жидкостей, а также жидкостей, находящихся при высоких температурах и давлениях.



Co-60, Cs-136

- 1 и 6 – источники излучения
- 2 – объект измерения
- 3 и 8 – приемники излучения - гамма-детекторы
- 4 и 9 – формирующие блоки
- 5 – электронный преобразователь (диф усилитель);
- 7 – компенсационный клин (гамма-поглотитель);
- 10 – реверсивный двигатель;
- 11 – дифференциально-трансформаторный преобразователь;
- 12 – вторичный прибор

Пример 5 – Схема радиоизотопного плотномера компенсационного типа

Вибрационные плотномеры

Принцип действия

Основаны на использовании зависимости собственной частоты колебаний механических резонаторов от плотности жидкости, находящейся внутри них

- + высокая точность (до 0,2%)
- + отсутствие движущихся деталей
- + метод применим для любого диапазона

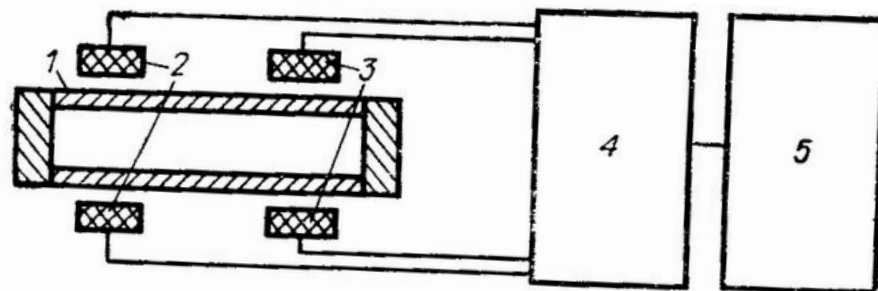


Рис. V-29. Схема вибрационного плотномера:
1 — полая трубка; 2 — электромагнит возбуждения; 3 — электромагнит съема сигнала; 4 — усилитель с обратной связью; 5 — блок измерения периода колебаний.

Наиболее распространенными являются проточные вибрационные датчики плотности с трубчатыми резонаторами, внутри которых протекает контролируемая жидкость

Ультразвуковые плотномеры

Принцип действия

Основаны на одновременном измерении акустического сопротивления ($R_{ак}$) и скорости ультразвука в измеряемой жидкости (v)

$$\rho = R_{ак} / v$$

- погрешность 10 кг/м³

Не нашли промышленного применения

материалов

Состав перерабатываемых материалов и готовой продукции –
важнейший технологический параметр в АСУ ХП.



Концентратомер

Определение
содержания одного
компонента



Анализаторы

Определение
состава
содержания двух и более
компонентов

Прямые методы

измерения
концентрации

Пример

ы:

Титровани
Химическое
поглощение

Лабораторные



Промышленные



Косвенные методы

измерения
концентрации

основаны на использовании однозначной
функциональной зависимости между каким-либо
физическим параметром анализируемого
вещества, доступным непосредственному
измерению, и составом этого вещества.

>>>

материалов

В качестве косвенного параметра может быть выбран измеряемый физический параметр, однозначно зависящий от состава вещества

Косвенные методы

измерения
концентрации

| Название метода | Физический параметр, зависящий от состава |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Электрокондуктометрический | Удельная электропроводность |
| Потенциометрический | Электродный потенциал |
| Абсорбционный спектральный | Спектр поглощения |
| Рефрактометрический | Показатель преломления раствора |
| Термокондуктометрический | Теплопроводность |
| Термохимический | Тепловой эффект каталитической реакции |
| Термомагнитный | Магнитопроницаемость |
| По температурной депрессии | Разность температур кипящего раствора и насыщенного пара при одном давлении |
| По давлению насыщенных паров | Зависимость упругости паров бинарной жидкости от соотношения ее компонентов |
| Хроматография | Различие в скорости сорбции отдельных компонентов анализируемой смеси специально выбранным сорбентом. |
| Масс-спектрометрия | Поведение ионизированных частиц анализируемого вещества с различным отношением массы к заряду в магнитном поле |

$$\frac{mv^2}{r} = zvB$$

материалов

Промышленный масс-спектрометр МТИ-350ГС

Назначение:

Предназначен для автоматического контроля состава смеси при сублиматном производстве гексафторида урана и оперативного управления технологическим процессом.

МТИ-350ГС обеспечивает измерение состава газовой смеси и управление работой реактора круглосуточно и непрерывно в полностью автоматическом режиме.

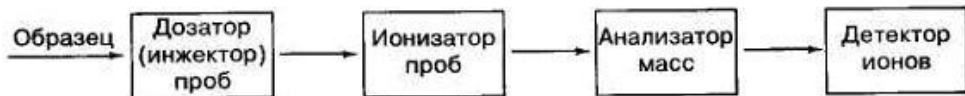
Характеристики:

Одновременно регистрируемые компоненты (массовые числа)

HF (20), N₂ (28), O₂ (32), F₂ (38), Ar (40), UF₆ (234 – 352)

Разрешающая способность (R) не менее 100

$$R = \frac{\text{Масса иона, а.е.м.}}{\text{Расстояние между соседними пиками, а.е.м.}}$$



На сублиматном производстве осуществляется фторирование закиси-оксида урана в пламенном реакторе. Для контроля процесса необходимо анализировать содержание следующих веществ: фторида водорода (HF), азота (N₂), кислорода (O₂), фтора (F₂), аргона (Ar) и гексафторида урана (UF₆). На основании сравнения результатов измерения содержания веществ с заданными уставками производится выработка управляющих и аварийных сигналов.

Методы и средства контроля кислотности (pH) растворов

pH – десятичный логарифм концентрации ионов водорода, взятый с обратным знаком

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]$$

аналогично

$$\text{pOH} = -\lg[\text{OH}^-]$$

для воды при $t=22^\circ\text{C}$ $[\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-] = 10^{-14}$

Это произведение называется **константой диссоциации** и установлено экспериментально

тогда $-\lg([\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-]) = -\lg[\text{H}^+] - \lg[\text{OH}^-] = \text{pH} + \text{pOH} = 14$

Т.к вода нейтральна, для неё $[\text{H}^+] = [\text{OH}^-] \Rightarrow \text{pH} = \text{pOH} = 7$

Кислотные и щелочные свойства растворов определяются активностью ионов водорода. При $t=22^\circ\text{C}$ нейтральные водные растворы имеют $\text{pH}=7$,
кислые растворы имеют $\text{pH}<7$,
а щелочные - $\text{pH}>7$.

Число pH определяется двумя методами: **колориметрическим** и **электрометрическим**

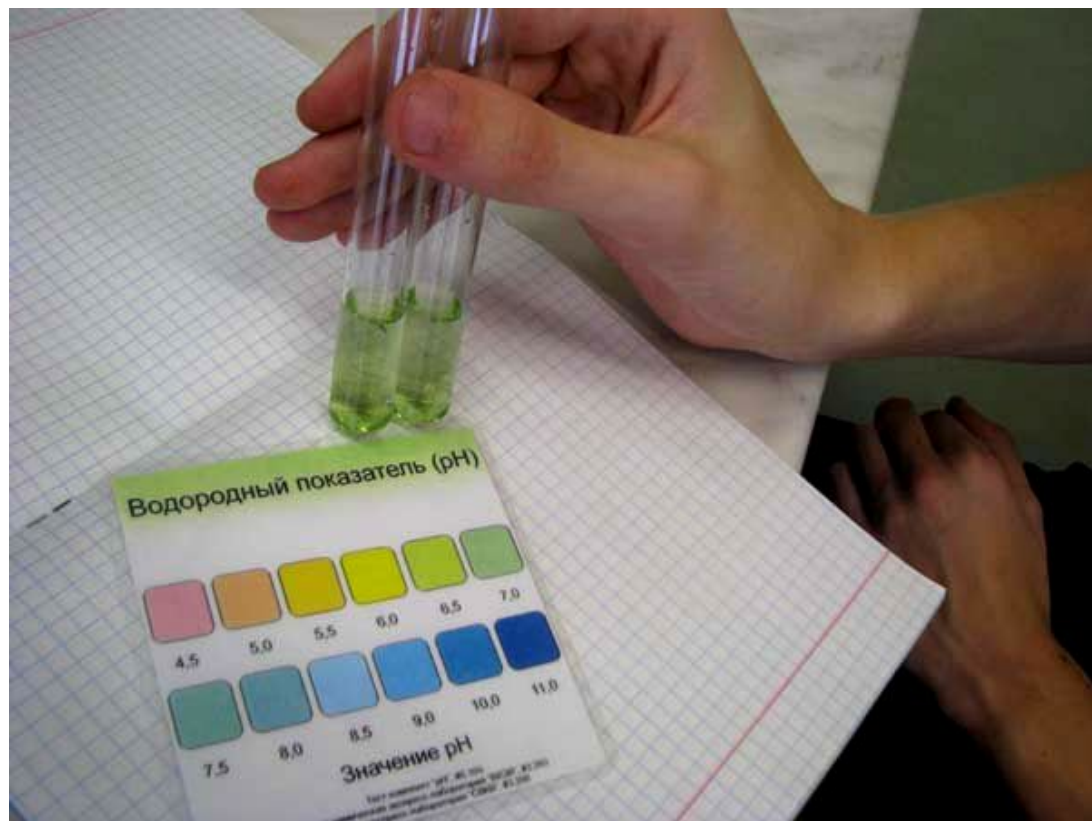
Колориметрический метод измерения концентрации ионов в растворе (числа pH)

Принцип

действия

Основан на свойствах некоторых органических красителей изменять свой цвет в зависимости от концентрации водородных ИОНОВ

Лабораторный метод



Электрометрический (потенциометрический) метод измерения концентрации ионов в растворе (числа pH)

Принцип

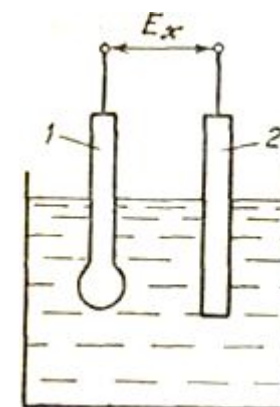
действия
Основан на измерении разности электрических потенциалов двух специальных электродов, помещенных в контролируемый раствор, один из которых (сравнительный) имеет постоянный потенциал

Датчик pH-метра состоит из двух электродов:
измерительного 1
и сравнительного 2

Измерительный электрод – стеклянная трубка, к нижней части которой приварен шарик из специального стекла, содержащего металл (Li или Na). Ионы водорода из раствора проникают в стекло шарика, а ионы металла переходят из стекла в раствор, в результате на поверхности шарика возникает потенциал, величина которого зависит от концентрации водородных ионов $[H^+]$ в растворе.

Сравнительный электрод, в отличие от измерительного, не меняет свой потенциал относительно раствора, поэтому ЭДС датчика E_x зависит только от потенциала измерительного электрода и, следовательно, pH раствора.

Промышленны
й
метод



Основные требования при измерении pH растворов:

- 1) Взрывобезопасность помещения!
- 2) Термостатирование раствора или компенсация показаний при её изменении
- 3) Защита от механических воздействий (ударная нагрузка, вибрация, перемешивание)
- 4) Отсутствие вблизи pH-метра источника электромагнитных полей

По месту расположения pH-метры различают:

Магистральные датчики pH-метров

Используются для технических трубопроводов диаметр которых меньше 150 мм, движение жидкости по трубам ламинарное. Корпус датчика – участок трубы, который вставлен в основной трубопровод, изготовлен из неметаллических материалов (керамика или пластмасса). В трубопровод вставляются электроды под углом друг другу

Проточные датчики

Устанавливается на дополнительных отводных линиях
+ можно устанавливать не нарушая технологического режима

Погруженные датчики

Используются для измерения pH в емкостях, могут
Устанавливаться различными способами
(на крышках аппаратов, на боковой стенке, на поплавке)



Внешний вид проточных pH-метров

Характеристики промышленных pH-метров серии ПМП

Область применения: оборотные воды предприятий, технологические растворы химических, нефтеперерабатывающих и других производств

Температура контролируемой среды: 0-100°C

Рабочее давление: 84-106,7кПа

Основная приведенная погрешность: $\pm 0,2$ pH

Длина погружной части ПП (для погружных):

600-2000мм

Выходные сигналы: 0-5мА, 4-20мА, 0-100мВ.



| Модификация | Диапазон измерения pH | Измерительный электрод | Очистка электродов | Тип первичного преобразователя |
|-------------|-----------------------|------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------|
| ПМП-112 | 0..14* | Стеклянный | нет | Магистральный |
| ПМП-131 | 2..12 | Металл-оксидный | Ультразвуковая | Магистральный |
| ПМП-131 | 0..14* | Стеклянный | Ультразвуковая | Магистральный |
| ПМП-2216 | 2..12 | Металл-оксидный с боковой рабочей поверхностью | Механическая | Погружной |
| ПМП-221т | 0..14* | Стеклянный | Механическая | Погружной |
| ПМП-232 | 2..12 | Металл-оксидный | Ультразвуковая | Погружной |

Промышленные pH-метры сохраняют работоспособность в кристаллизующихся, плёнкообразующих, содержащих твердые частицы и фторсодержащих жидких средах. Это достигается применением металлооксидных электродов, поверхность которых подвергается автоматической очистке

Методы и средства контроля вязкости жидкостей и газов

Вязкость (внутреннее трение) - свойство текущих тел (жидкостей и газов) оказывать сопротивление перемещению одной их части относительно другой

Основной закон вязкого течения

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{dW}{dn}$$

Формула Ньютона

F – сила, вызывающая сдвиг слоев относительно друг друга
 S – площадь слоя, по которому происходит сдвиг
 $\frac{dW}{dn}$ – градиент скорости течения (быстрота изменения скорости от слоя к слою) по нормали к n
 η – **динамическая вязкость** - характеризует сопротивление жидкости (газа) смешению её слоёв, ед.изм. Пуазель (Пз), Па·с

Текучесть – величина обратная вязкости $\varphi = \frac{1}{\eta}$

Кинематическая вязкость – отношение вязкости к плотности $\nu = \frac{\eta}{\rho}$
ед.изм. Стокс (Ст), м/с

Вязкость жидкостей с увеличением t° уменьшается, а газов - увеличивается

Вязкость (20°C (мПа·с)



Вискозиметры с падающим телом

Принцип действия основан на измерении скорости (или времени) движения тела (шарика) под действием сил тяжести и трения в анализируемой жидкости. Скорость падения будет тем меньше, чем больше вязкость жидкости. По закону Стокса:

$$v = \frac{2}{9} \frac{g(\rho_{\text{ш}} - \rho)r_{\text{ш}}^2}{\eta}$$

- v – скорость равномерного падения шарика;
- ρ – плотность анализируемой жидкости ($\rho_{\text{ш}} \geq \rho$);
- $\rho_{\text{ш}}$ – плотность шарика;
- η – вязкость анализируемой среды;
- $r_{\text{ш}}$ – радиус шарика.

Обычно измерение скорости сводится к измерению отрезка времени t , за который шарик, падая, проходит некоторый постоянный отрезок пути l

$$t = \frac{l}{v} = k\eta$$

При включении насоса шарик 6 поднимается и останавливается у верхней ограничивающей сетки. В момент прикасания к сетке насос автоматически отключается блоком 4, управляемым сигналом усилителя 5, и шарик падает в неподвижной среде

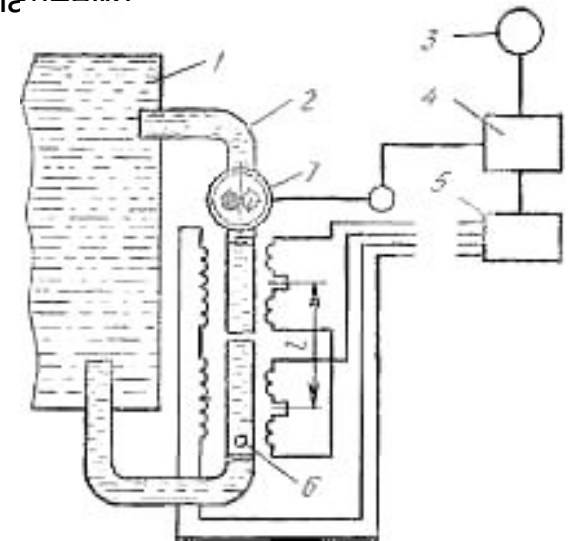


Схема шарикового вискозиметра

Вискозиметр Гепплера с падающим шариком

Технические характеристики

| | | |
|----------------------|---------------------------------------|------------------------|
| Диапазон вязкости | | 0,5 – 105 мПас (сПз) |
| Диапазон температуры | | от -20 до +120 °С |
| Точность | | 1 % |
| Материал | измерительная трубка, шарики 1, 2 и G | боросиликатное стекло |
| | шарики 3, 4, 5 и 6 | железо-никелевый сплав |

- + Цифровой секундомер, ЖК-дисплей
- + Для каждого поддиапазона свой шарик. Шарик G для газов
- + Циркуляционный термостат
- + Возвратное движение шарика при повороте трубки на 180° можно использовать для дополнительных измерений



Применение в промышленности: для разовых экспресс-измерений

Химическая промышленность

(полимерные растворы, растворители, красители)

Нефтехимия (масла, жидкие углеводороды)

Фармацевтическая промышленность (сырье, глицерин)

Пищевая промышленность (желатин, сиропы)

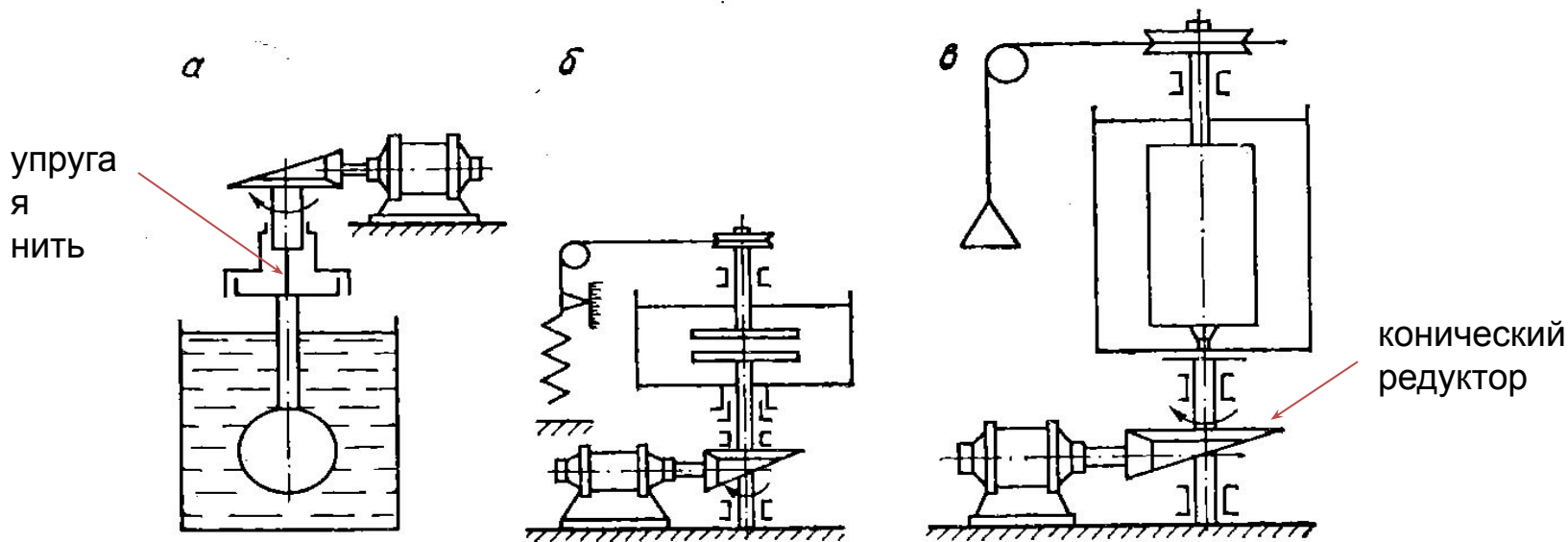
Вискозиметры ротационные

Принцип действия основан на измерении крутящего момента, возникающего на основании ротора (цилиндра, диска т.п.) погруженного в измеряемую среду, при взаимном их перемещении

При угловой скорости вращения ротора $\omega = \text{const}$ крутящий момент однозначно определяет вязкость среды:

$$M = k \cdot \eta \cdot \omega$$

k – коэффициент, зависящий от конструкции ротора, постоянная прибора;
 η – вязкость среды;
 ω – угловая скорость вращения;



- а – измерение крутящего момента по углу поворота упругой нити подвески
- б – по натяжению уравновешивающей пружины
- в – ротационный вискозиметр с коаксиальными цилиндрами

Вискозиметры вибрационные

Принцип действия: Вязкость оценивается по изменению амплитуды вынужденных колебаний тела, погруженного в контролируемую среду, в зависимости от вязкости этой среды

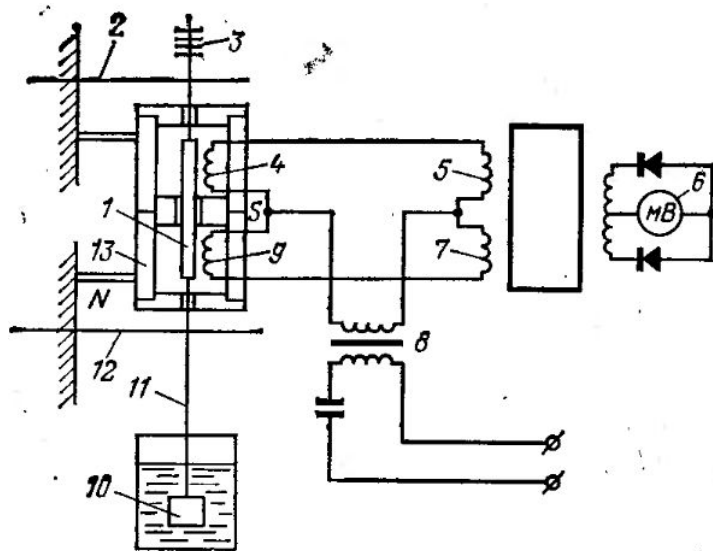
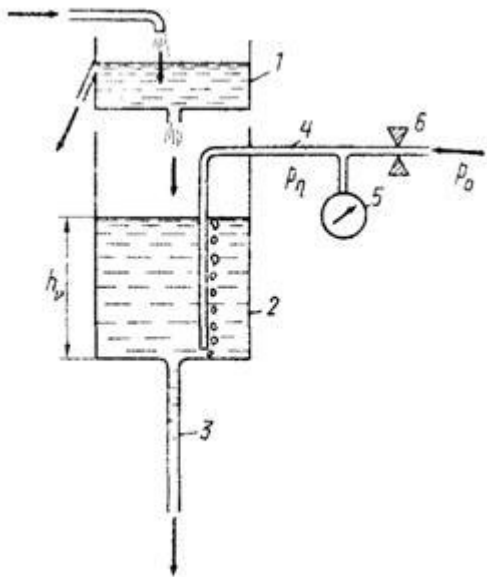


Рис. VI-26. Схема электрического вибрационного вискозиметра:

1 — сердечник; 2, 12 — ленты; 3 — сменная шайба; 4, 5, 7, 9 — обмотки; 6 — регистрирующий прибор; 8 — стабилизатор; 10 — насадка; 11 — штук; 13 — постоянный магнит.



Вискозиметры капиллярные (истечения)

Принцип действия основан на измерении времени, за которое жидкость определенного объема вытечет из емкости через калиброванное отверстие, или на измерении разности давлений на входе и выходе из капиллярной трубки, через которую протекает контролируемая среда.