

Министерство образования и науки Российской Федерации
«Южно-Уральский государственный университет» (НИУ)
Факультет «Компьютерных технологий, управления и радиоэлектроники»
Кафедра «Приборостроение»

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Доклад

Григорьева Анастасия Владимировна, КТУР-166

Руководитель: А.А. Лысова, доцент

Челябинск 2015

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

Связь между важнейшими термодинамическими параметрами газа определяется соотношением

$$\frac{pV}{T} = \text{const}$$

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

Уравнение состояния для произвольной массы идеального газа (уравнение Клайперона-Менделеева) имеет вид

$$pV = \frac{m}{\mu} \cdot RT$$

где m – масса газа;

μ – масса одного киломоля газа;

R – универсальная газовая постоянная.

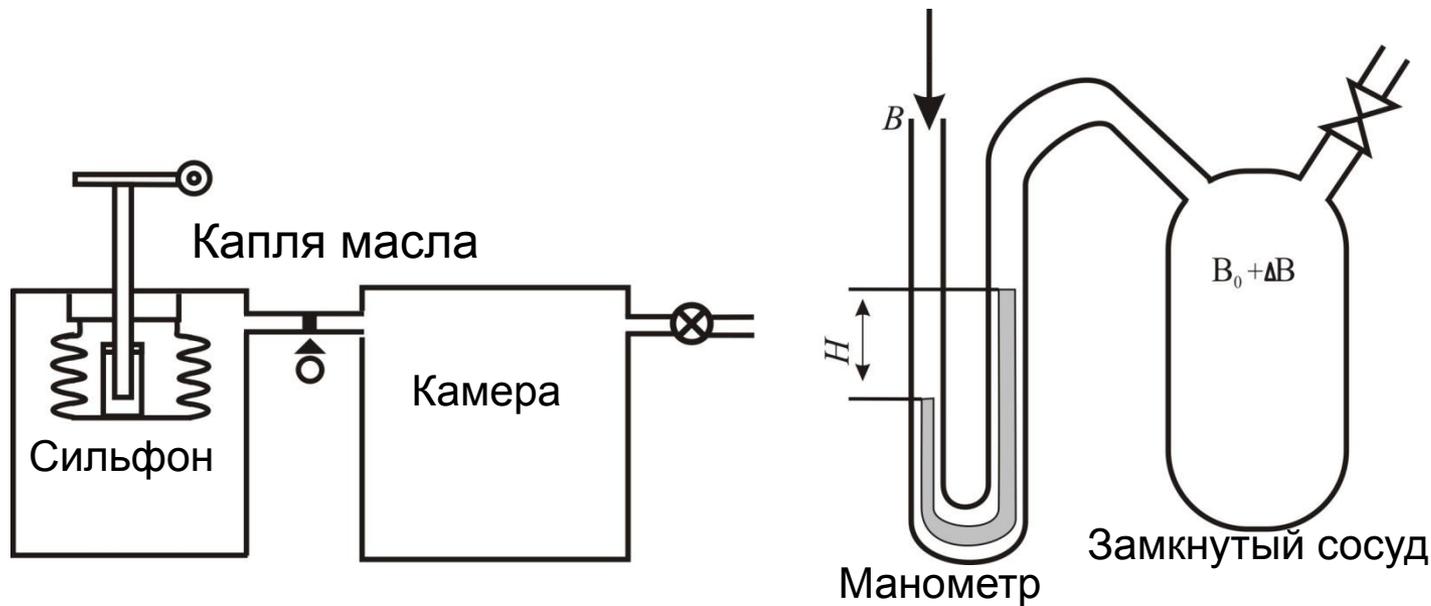
Для упрощения процесса измерения давления один из параметров состояния

(T или V) сохраняется **ПОСТОЯННЫМ**. Тогда давление однозначно определяется по результатам измерения V или T .

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

Принципиальная схема газового барометра



МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

В соответствии с формулой

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 = \text{const}$$

Изменение атмосферного давления

$$\Delta B = B_0 \frac{\Delta V N_0}{1 - \Delta V / V_0}$$

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

Газовые барометры в связи с появлением высокоточных деформационных барометров аналогичного назначения **в настоящее время практически не применяются.**

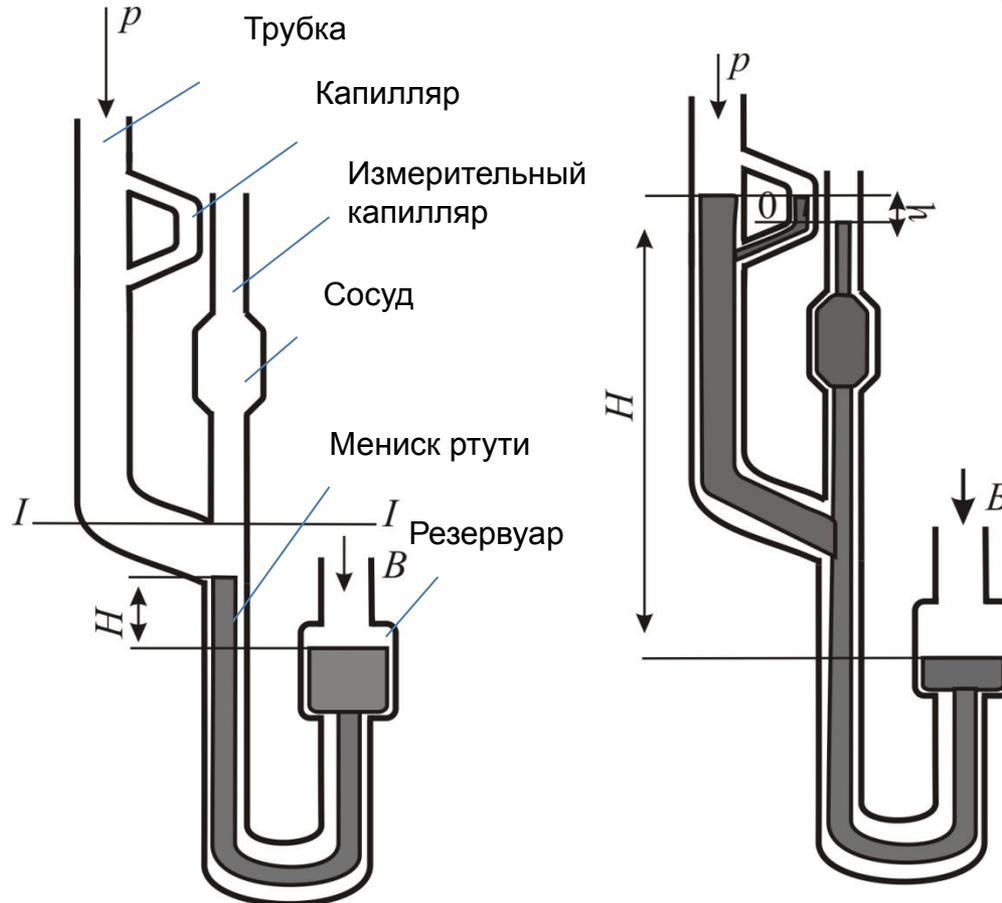
В отличие от этого в области вакуумных измерения указанный принцип находит широкое применение.

Компрессионные («компрессия» – сжатие) и **экспансионные** («экспансия» – расширение) манометры являются основными средствами воспроизведения и передачи единица давления в области вакуумных измерения в диапазоне от 10^{-3} до 10^3 Па (10^{-5} – 10 мм Рт. Ст.).

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

Принципиальная схема компрессионного манометра



МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

В соответствии с законом Бойля – Мариотта давление станет равным

$$P_{\text{к}} = \frac{V}{V_{\text{к}}} \cdot p$$

Принимая во внимание, что давление p в вакуумной системе при этом не изменяется

$$p = \frac{V_{\text{к}}/V}{1 - V_{\text{к}}/V} \cdot h \cdot \rho \cdot g$$

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

Экспансионные манометры в отличие от **компрессионных** основаны на понижении известного давления от требуемого значения. Для этого в сосуде с относительно небольшим объемом V_1 создается давление, достаточное для точных измерений.

Давление понизится в отношении начального и конечного объемов

$$p_2 = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \cdot p \cong \frac{V_1}{V_2} \cdot p_1$$

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

Установки с **компрессионным** и **экспансионным** манометрами, дополняя друг друга, обладают наивысшей в области вакуумных измерений точностью.

Для определения давления применимо также уравнение состояния газа при постоянном объеме (изохорический процесс) .

В этом случае уравнение состояния принимает вид (закон Шарля, 1787 г.)

$$p = k \cdot T$$

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

При постоянной массе газа и неизменном объеме давления газа прямо пропорционально его абсолютной температуре.

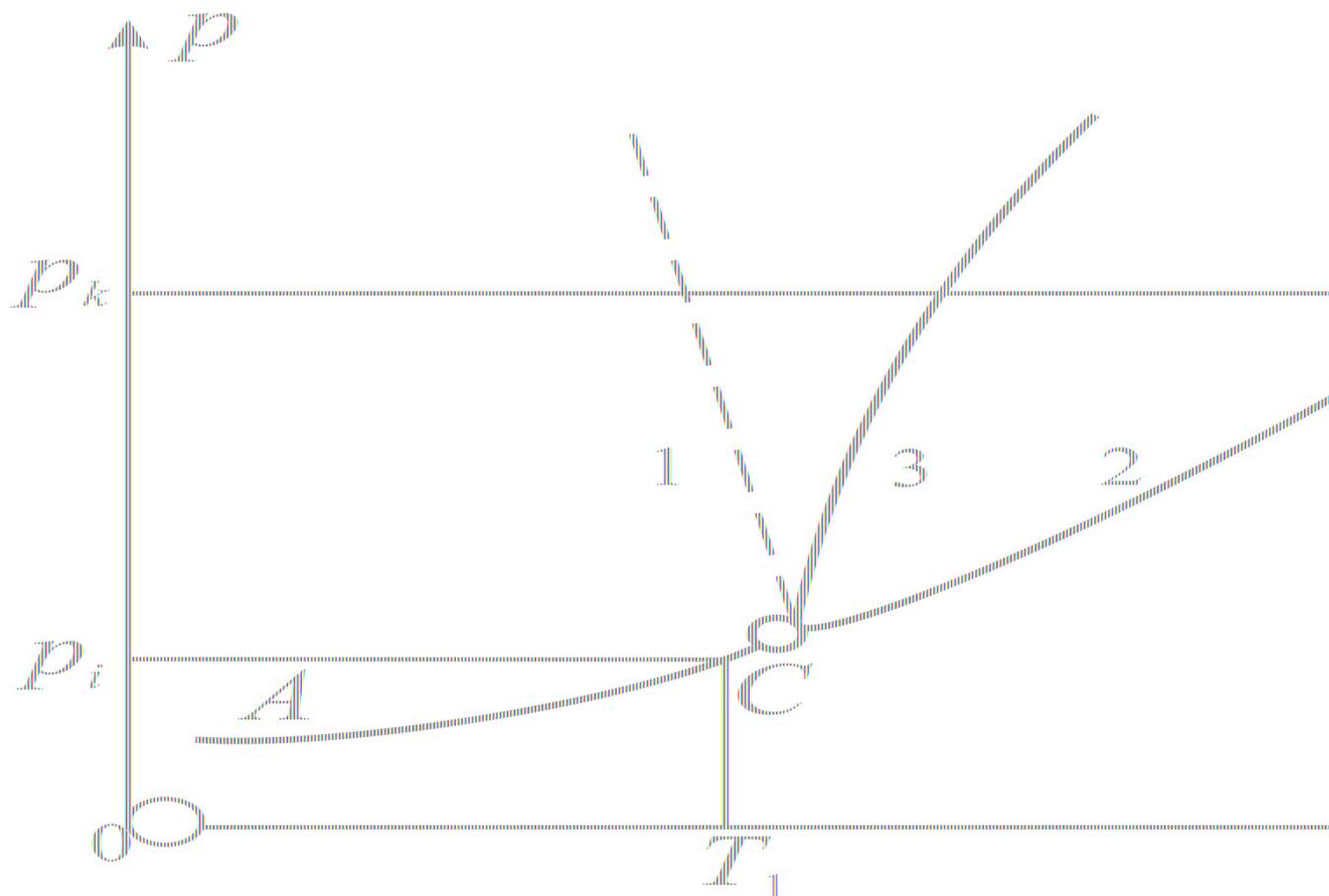
Однако, несмотря на предельную простоту метода, его реализация связана с необходимостью применения довольно сложных автоматических систем для приведения температуры в соответствие с измеряемым давлением, что **осложняется инерционностью процесса нагрева (охлаждения) газа.**

Поэтому этот метод практического **применения не нашел.**

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

Типовая диаграмма состояний



МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

Указанные выше кривые равновесия фаз и тройная точка используются в косвенных методах определения давления по результатам измерения температуры в равновесных точках.

Поэтому кривые плавления используются в косвенных методах определения высоких и сверхвысоких давления.

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

В области измерения высоких и сверхвысоких давлений его значение воспроизводится по кривой плавления ртути, полуэмпирическое уравнение которой которое получают по результатам исследований сравнением с эталонным поршнем манометром.

Это позволяет построить непрерывную шкалу давлений, по которой градуируются средства измерений высоких и сверхвысоких давлений низшей точности.

В нашей стране (НПО «ВНИИФТРИ») разработана шкала давлений, основанная на кривой плавления ртути (КПР – 83), которая охватывает диапазон давлений от 100 до 4000 МПа.

Погрешность воспроизведения давления 0,05 % в диапазоне от 100 до 4000 МПа; 0,5 % – до 2500 МПа и 1 % – до 4000 МПа.

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

В области средних давлений, где успешно применяются высококачественные средства измерений, основанные на прямых методах, использование косвенных методов нецелесообразно.

Однако представляет интерес получивший распространение в первой половине нашего века **простой способ измерения атмосферного давления, основанный на фазовых переходах «жидкость – пар»**

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на уравнении состояния идеального газа

Уравнение для описания процессов плавления и сублимации.

$$p = p_0 + k(t - t_0)$$

где t – температура кипения воды;

$t_0 = 100^\circ\text{C}$; $p_0 = 1013$ гПа (760 мм рт.ст.);

$k = 35,5$ гПа/ $^\circ\text{C}$ (26,7 мм рт.ст./ $^\circ\text{C}$).

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на фазовых переходах

Из формулы следует, что погрешность измерения температуры $\Delta t = 0,01^\circ\text{C}$ приводит к погрешности измерения давления $\Delta p = 0,4 \text{ гПа}$ (0,3 мм рт.ст).

Это примерно соответствует точности ртутных барометров.

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на фазовых переходах

Для определения давления находят также применение методы, основанные на зависимости от давления различных физических свойств жидкостей и газов и протекающих в них процессах.

В области **высоких** и **средних** давлений указанные методы широкого распространения не получили в связи с их относительной сложностью и трудоемкостью по сравнению с другими методами.

В области вакуумных измерений указанные методы применяются практически повсеместно.

Зависимость теплопроводности разреженного газа от давления используется в **тепловых и термодарных манометрах**; зависимость тока положительных ионов от измеряемого давления – в **ионизационных манометрах**.

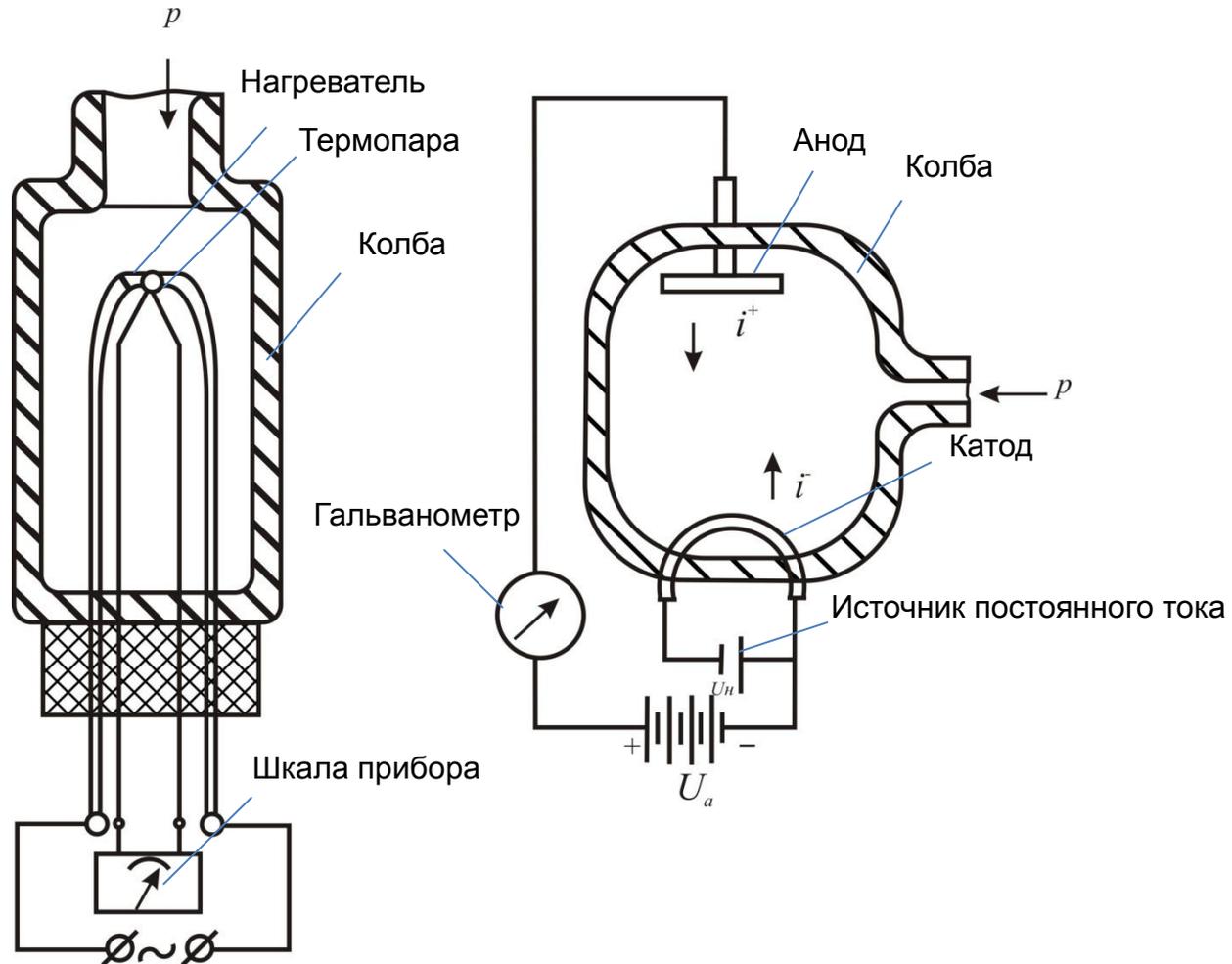
Наибольшее распространение в вакуумной технике получили **термодарные и ионизационные манометры**.

Термодарный манометр так же, как и тепловой, основан на зависимости теплопроводности разреженного газа от давления.

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на изменении физических свойств измеряемой среды

Термопарный манометр



МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на изменении физических свойств измеряемой среды

Принцип действия ионизационного манометра основан на зависимости от давления тока положительных ионов, образованных в результате ионизации разряженного газа.

Ионизация газа осуществляется электронами, ускоряемыми электрическим или магнитными полями, а также посредством излучения радиоизотопов.

При одном и том же количестве электронов, пролетающих через газ, или постоянной мощности излучения **степень ионизации газа пропорциональна концентрации его молекул** т.е. измеряемому давлению.

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Косвенные методы, основанные на изменении физических свойств измеряемой среды

Для увеличения степени ионизации между анодом и катодом помещена сетка, на которую подается напряжение, сообщающее дополнительное ускорение потоку электронов.

Манометры этого типа охватывают диапазон от 10^{-7} до 1 Па, дополняя диапазон измерений термодинамического манометра.

$$p = k \cdot \frac{i^+}{i^-}$$

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Агрегатные состояния вещества

Жидкости по своим механическим свойствам разделяют на **малосжимаемые и сжимаемые**.

Капельные жидкости имеют определенный **объем**, который практически **не меняется под действием приложенных сил**.

Газы же, занимая все предоставленное пространство им пространство, **могут существенно изменять свой объем** сжимаясь и расширяясь под действием сил.

Таким образом, **капельные жидкости легко изменяют свою форму** и с трудом изменяют свой объем.

Газы же легко изменяют свою как свою форму, так и объем.

МЕТОДЫ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ

Агрегатные состояния вещества

Пар – одна из разновидностей газообразных веществ, отличающаяся неустойчивостью агрегатного состояния.

При изменении температуры, давление или объема пар может частично переходить из газообразного состояния в жидкое и наоборот.

Если для этого перехода достаточно очень незначительных изменений температуры, давления или объема, то пар называют **насыщенным**.

Если пар содержит жидкую фазу в виде мелких капель или тумана, его называют влажным.

Пар, в котором отсутствует жидкая фаза, называется **сухим насыщенным паром**.

Если температура пара выше температуры сухого насыщенного пара при том же давлении, его называют **перегретым**.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока.

Жидкости двигаются сплошным потоком, ограниченным стенками трубы, канала или свободной поверхностью.

При этом скорости движения различных частиц жидкости, распределенных по сечению потока, **отличаются друг от друга: у стенки трубы они равны нулю и максимальны на ее герметической оси.**

Это обуславливается, во – первых, тормозящим действием стенок; во – вторых, внутренним трением слоев жидкости, которое зависит от ее вязкости.

Поэтому в качестве обобщенной количественной характеристики используют среднюю по сечению скорость v_{cp} движения жидкости.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока

Потоки жидкости по качественным признакам делят на **установившиеся** и **неустановившиеся**, **равномерные** и **неравномерные**, **ламинарные** и **турбулентные**.

Поток называется **установившемся**, если средняя скорость и расход в данном сечении потока не меняются во времени.

Поток, не удовлетворяющий этому требованию, называется **неустановившимся**.

Установившемся потоком может быть истечение жидкости из отверстия в стенке резервуара при постоянном напоре; при переменном напоре истечение жидкости будет неустановившимся.

Частным случаем неустановившегося потока является пульсирующий поток, характеризуемый пульсациями средней скорости.

При этом амплитуда и частота пульсаций могут быть как детерминированными величинами, так и случайными величинами.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока

Полностью установившиеся потоки жидкости в природе практически не встречаются.

Если амплитудно-частотные изменения расхода заметно не влияют на характер рассматриваемого явления, то поток называют **квазиустановившемся**.

Поток называется **равномерным**, если средняя скорость остается неизменной во всех сечениях по его длине; в противном случае поток называется **неравномерным**.

Таким образом, **установившимся** называют поток, неизменный во времени, но изменяющийся в пространстве, а **равномерным** – поток, неизменный в пространстве.

По внутренней структуре, характеру течения жидкости потоки **разделяют на ламинарные и турбулентные**.

При ламинарном потоке элементарные струйки жидкости движутся, не перемешиваясь, параллельно друг другу.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока

Для турбулентных потоков характерно хаотическое перемещение частиц жидкости, образование „вихревых волчков” и пульсация.

При этом за счёт интенсивного перемешивания слоев жидкости эпюра скоростей выравнивается.

Максимальная скорость в зависимости от диаметра и шероховатой трубы составляет 1,16 – 1,27 средней скорости.

Ламинарные потоки характерны для течений с небольшими скоростями жидкостей большой вязкости и малой плотности по трубам малого диаметра.

Наоборот, большие скорости течения, большие диаметры труб, малая вязкость и большая плотность жидкости характеризуют условия турбулентного потока.

Вследствие этого, критерием, однозначно определяющим ламинарный или турбулентный характер потока, является безразмерная величина.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{v_{\text{ср}} \cdot d \cdot \rho}{\mu}$$

где d – диаметр трубопровода;

ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ;

μ - динамический коэффициент вязкости жидкости, $\text{Н} \cdot \text{с/м}^2$.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока

Точности измерений расходов ламинарных потоков значительно меньше, чем измерений расхода турбулентных потоков.

Область, в которой гидравлические и рабочие коэффициенты приборов для измерения расхода постоянны, называется **автомодельной**.

Обычно $Re_{пр} \geq Re_{кр}$, поэтому измерения в турбулентных потоках более точны, чем в ламинарных.

Существенное значение для характеристики турбулентного потока имеет число Крмана, равный отношению среднего квадратического значения пульсаций продольной скорости v_{cp} : $K_v = a/v_{cp}$.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока

В гидрометрической различают два вида трубопроводов: **гидравлические гладкие**, для которых коэффициент гидравлического трения λ зависит лишь от числа Re и не зависит от $k_{ш}$, и **шероховатые трубы**, для которых λ зависит лишь от $k_{ш}$ и не зависит от Re .

Существенное значение для расходоизмерительной практики имеет и такая характеристика потока, как его **«осесимметричность»**.

Эпюра скоростей равномерного установившегося потока в длинном прямо участке трубопровода симметрична относительно оси трубы, где скорость максимальна.

Такой поток называют **осесимметричным**.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока

Для двух произвольных сечений потока площадью F_1 и F_2 условие неразрывности может быть записано в виде

$$F_1 \cdot v_{\text{ср1}} \cdot \rho_1 = F_2 \cdot v_{\text{ср2}} \cdot \rho_2$$

Для капельных жидкостей, приняв $\rho_1 = \rho_2$, уравнение можно упростить

$$F_1 \cdot v_{\text{ср1}} = F_2 \cdot v_{\text{ср2}}$$

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока

В любых процессах, происходящих в природе, может меняться лишь форма энергии, но не ее количество.

Это непоколебимый закон физики – **закон сохранения энергии**.

Аналитическое выражение закона сохранения энергии в потоках жидкости впервые было получено Даниилом Бернулли.

По аналогии с механикой твердого тела полная энергия движущейся жидкости состоит из **кинетической и потенциальной**.

Потенциальная энергия определяется энергией положения и энергией упругого состояния.

Сжатый газ может совершать работу. Мерой этой „возможной” работы и будет потенциальная энергия упругого состояния.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока

Удельная кинетическая энергия при этом

$$\mathcal{E}_{\text{ку}} = \frac{v_{\text{ср}}^2}{2}$$

Удельная потенциальная энергия положения массы жидкости, расположенной на высоте z , отсчитываемой от любой условной плоскости

$$\mathcal{E}_{\text{пу}} = gz$$

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока

При этом удельная потенциальная энергия, обусловленная упругим состоянием массы жидкости

$$\mathcal{E}_{yy} = \frac{p}{\rho}$$

Запас полной удельной механической энергии, которую несет в себе единица массы движущейся жидкости

$$\mathcal{E}_y = \frac{v_{\text{ср}}^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho}$$

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока

Если пренебречь потерями на трение, то математическое выражение закона сохранения энергии для этого случая будет иметь вид

$$\mathcal{E}_y = \frac{v_{\text{ср}}^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} = \text{const}$$

Для потока идеальной жидкости справедливо равенство

$$z_1 + \frac{v_{\text{ср}1}^2}{2g} + \frac{p_1}{g\rho_1} = z_2 + \frac{v_{\text{ср}2}^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho_2}$$

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока

При течение реальных жидкостей вследствие потерь на вязкостное трение полная механическая энергия потока будет убывать.

Уравнение Бернулли принимает вид

$$z_1 + \frac{v_{\text{cp1}}^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma_1} = z_2 + \frac{v_{\text{cp2}}^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma_2} + \lambda \frac{\overset{\cdot}{v}_{\text{cp2}}^2}{2g}$$

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Поток жидкости. Основные характеристики потока

Уравнение неразрывности потока и уравнение Бернулли – два фундаментальных уравнения механики жидкости, которые положили начало созданию научнообоснованных методов измерения расхода и до настоящего времени не потеряли своего прикладного значения в измерительной практике и приборостроении.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Расход жидкости. Основные понятия

Расходом называется количество жидкости, протекающее через поперечное сечение потока в единицу времени.

Массовый и объемный расходы связаны с зависимостью, аналогичной зависимости между массой и объемом вещества

$$M = \rho Q$$

Объемный расход можно выразить через среднюю скорость

$$Q = v_{\text{ср}} \cdot F$$

Так для неустановившихся потоков средняя скорость случайным образом изменяется во времени, то и расхода в общем случае является случайной величиной, а точнее – случайным процессом.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Расход жидкости. Основные понятия

Мгновенные расходы измеряют, как правило, при управлении технологическими процессами, обеспечении оптимальных режимов работы энергетических установок и тепловых двигателей; **средние расходы** – при испытаниях, определении «расходных характеристик» объектов и процессов, при учетных операциях.

И наконец, **«пиковые»** расходы характерны для исследовательских работ, связанных с долгосрочными прогнозами поведения грунтовых и сточных вод, паводковых явления в открытых каналах и руслах

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Расходомеры. Общая классификация. Перспективы развития

Технические устройства, предназначенные для измерения массового или объемного расхода, называют расходомерами.

Существуют много различных признаков, по которым можно классифицировать расходомеры.

По принципу измерений расходомеры **классифицируют по следующим основным группам:**

Наибольшее распространение получили следующие расходомеры.

- расходомеры переменного перепада давления;
- расходомеры обтекания;
- тахометрические расходомеры;
- электромагнитные расходомеры;
- ультразвуковые расходомеры;

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Расходомеры. Общая классификация. Перспективы развития

Так, увеличение функциональных возможностей приборов за счет усложнения снижает их надежность вследствие возрастания числа подверженным отказам элементов.

Увеличение быстродействия снижает эффективность систем автоматической компенсации медленно меняющихся погрешностей, вызванных влиянием внешней среды, параметров измеряемых объектов и т.п.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ПОЛОЖЕНИЯ

Расходомеры. Общая классификация. Перспективы развития

Значительная часть серийно выпускаемых расходомеров имеет класс точности (приведенную погрешность) **1–1,5%**.

Если принять, что измерения преимущественно проводятся в середине шкалы, относительная погрешность этих измерений составляет **2 – 3%**.

Именно это обстоятельство обуславливает необходимость создания и внедрения расходомеров, имеющих класс не хуже **0,1 – 0,3%**.

Характерная особенность расходоизмерительной практики – **чрезвычайно широкая номенклатура измеряемых веществ**, имеющих различные физико-химические свойства – плотность, вязкость, температуру, фазовый состав и структуру.